



**Терентьєв О.М., Стовпник С.М., Гонтарь П.А., Клещов А. Й.**

# **РЕЗОНАНСНЕ ЕНЕРГООЩАДНЕ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД**

**ТОМ 2**

**ВИБУХО-МЕХАНІЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ ВИБОЇВ**

**Монографія**

Рекомендовано Вченою радою Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Київ – 2018

Рекомендовано до друку Вченою радою  
Національного технічного університету України  
«Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського»  
(протокол № 5 від 14 травня 2018)

За повного або часткового відтворення матеріалів даної публікації  
посилання на видання обов'язкове

**Рецензенти:**

**Бойко В.В.** – доктор технічних наук, професор, завідувач науково-дослідної лабораторії з проблем сейсмічної безпеки технологічних вибухів Інституту гідродинаміки НАН України;

**Садovenko І.О.** – доктор технічних наук, професор кафедри гідрогеології та інженерної геології Національного гірничого університету МОН України.

**Відповідальний редактор:**

**Ткачук К.К.** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Р 34 Резонансне енергоощадне руйнування гірських порід: монографія / Том 2. **Вибухо-механічні навантаження вибоїв** [Текст] / О.М. Терентьев, С.М. Стовпник, П.А. Гонтарь, А.Й. Клещов – К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 161 с.  
ISBN 978-617-7185-23-8

У монографії запропоновано новий спосіб комбінованого вибухо-механічного руйнування гірських порід. Особливістю нового способу є формування на вибої кумулятивного вибухового ядра. Це дозволило додатково до існуючої природної дефектності гірських порід сформувати технологічну тріщинуватість концентрацією енергії вибуху. Отримано залежності енергоємності руйнування вибою від частоти його навантажень кумулятивним вибуховим ядром та температури вибуху. Вивчено зміну модуля пружності I роду та швидкість ультразвукових хвиль в гірських породах від частоти навантажень кумулятивним вибуховим ядром. Створено експериментальний пристрій комбінованої дії вибухо-механічними навантаженнями.

Розраховано на студентів гірничих спеціальностей, працівників профільних організацій.

**ISBN 978-617-7185-23-8**

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	5
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 КОМБІНОВАНЕ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД .....	8
1.1 Способи руйнування гірських порід.....	8
1.2 Класифікація комбінованого руйнування.....	21
1.3 Вибухо-механічне руйнування.....	24
Висновки.....	26
РОЗДІЛ 2 ПЛАНУВАННЯ ВИБУХО-МЕХАНІЧНОГО РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД.....	27
2.1 Композиційний план вибухо-механічного руйнування .....	27
2.2 Обладнання вибухо-механічного руйнування .....	31
2.3 Структура вибухо-механічного руйнування.....	49
Висновки.....	61
РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕНЕРГОЄМНОСТІ ВИБУХО- МЕХАНІЧНОГО РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД.....	62
3.1 Критерії руйнування гірських порід.....	62
3.2 Модель вибухо-механічного руйнування.....	73
3.3 Адекватність моделі вибухо-механічного руйнування.....	76
Висновки.....	81
РОЗДІЛ 4 ВИБУХО-МЕХАНІЧНЕ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД....	83
4.1 Апробація вибухо-механічного руйнування .....	83
4.2 Результати вибухо-механічного руйнування .....	89
4.3 Обробка результатів та перевірка з математичною моделлю.....	124
Висновки.....	127

РОЗДІЛ 5 ПРОМИСЛОВЕ ВПРОВАДЖЕННЯ ВИБУХО-МЕХАНІЧНОГО РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД .....	129
5.1 Місце впровадження вибухо-механічне руйнування граніту.....	129
5.2 Впровадження вибухо-механічного руйнування.....	131
5.3 Економічний ефект вибухо-механічного руйнування.....	140
Висновки.....	143
ЗАКЛЮЧЕННЯ.....	144
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	145
ДОДАТОК А Акт впровадження вибухо-механічного руйнування гірських порід.....	161

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

**Аб** – абразивне руйнування.

**Віб** – вібраційне руйнування.

**В.о.** – відносна одиниця.

**ВГМ** – вертлюг модифікований.

**Виб** – вибухове руйнування.

**ВІТР** – Всесоюзний Інститут техніки розвідки.

**Г** – гідравлічне руйнування.

**ДСТУ** – державні стандарти України.

**Е** – електроімпульсне руйнування.

**ЗКМ** – заряд кумулятивний малий.

**КВЯ** – кумулятивне вибухове ядро.

**Л** – лазерне руйнування.

**Мех** – механічний.

**НПАОП** – нормативно-правові акти з охорони праці.

**НРВ** – невзрывчатое разрушающее вещество.

**НРС** – невзрывчатая разрушающая смесь.

**О** – обертове руйнування.

**П** – плазмове руйнування.

**ПП** – приватне підприємство.

**ПЧЕ** – повний чинниковий експеримент.

**КДП** – коронка долотчата пластинчаста.

**РАП** – рентгенівський апарат.

**РЕМ** – растровый електронний мікроскоп.

**СБГМ** – станок буровой термо-механический.

**СБУ** – станок буровой ударно-обертальный.

**СБШ** – станок буровой шарошковый.

**Т** – термічне руйнування.

**У** – ультразвукове руйнування.

**Уд** – ударне руйнування.

**УЗ** – ультразвук.

**УИСУ** – установка измерения скорости ультразвуковых волн.

**Х** – хімічне руйнування.

**ХМ** – хром-молібден.

**ЦКП** - центральний композиційний план.

**ISO** – International organization of standardization.

**Nd:YAG** - neodymium-doped yttrium aluminum garnet.

## ВСТУП

Сумарні запаси природного декоративного каменю в Україні становлять понад 500 млн м<sup>3</sup> [1]. Розвідані запаси на 74 % (118 млн м<sup>3</sup>) [1] складаються з граніту, габро, лабрадориту – скельних гірських порід (ГП). Буріння шпурів в цих ГП характеризується енергоємністю понад 120 кВт·год/м<sup>3</sup> [2]. Це обумовлено тим, що згідно з діаграмою деформування [3] близько 90 % енергії витрачається на «підготовку» ГП до руйнування. Оскільки процес руйнування ГП - найбільш енергоємний та його об'єми ростуть, особлива увага приділяється раціональному використанню енергії.

Проводяться пошуки комбінацій механічних та немеханічних способів для зниження енергоємності руйнування ГП. Таке поєднання забезпечить руйнування ГП в широкому діапазоні їх фізико-механічних властивостей. Аналіз фундаментальних праць з теорії вибуху Баума Ф. А., Бойка В. В., Вовка О. О., Кравця В. Г., Лаврентьєва М. О., Орленка Л. П., Станюковича К. П., Фортова В. Е. [4-11] обумовив розробку саме вибухо-механічного способу руйнування ГП. Вплив енергії вибуху на вибій послаблює ГП, формуванням внесеної технологічної тріщинуватості, додатково до існуючої природної. В результаті знижуються міцнісні властивості ГП і витрати енергії на руйнування. Незважаючи на енергетичні показники вибухової хвилі, важливо забезпечити її керованість. Зниження енергоємності вибухо-механічного руйнування ГП за рахунок спрямування енергії вибуху перпендикулярно до вибою є актуальною науково-технічною задачею.

Дослідження виконано згідно із завданням Постанови Кабінету Міністрів України від 1 березня 2010 р. № 243 «Про затвердження Державної цільової економічної програми енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлювальних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010 - 2016 роки» [12]. Науково-технічну задачу, на вирішення якої спрямована робота, обрано з аналізу Енергетичної стратегії України на період

до 2035 року, розроблену Національним інститутом стратегічних досліджень України [13].

Згідно наведених вище документів слід удосконалювати технології руйнування гірських порід. Для цього обрані комбіновані вибухо-механічні навантаження порід. Їх реалізація потребує:

- вибір і обґрунтування енергоефективного комбінованого способу руйнування гірських порід з використанням кумулятивного вибухового ядра (КВЯ);

- математичне моделювання енергоємності руйнування гірських порід в умовах вибухо-механічних навантажень;

- експериментальне встановлення впливу частоти навантажень вибою КВЯ та температури вибуху на питому енергоємність вибухо-механічного руйнування гірських порід;

- розробку та впровадження методики розрахунку енергоємності вибухо-механічного руйнування гірських порід з керованим КВЯ.

## РОЗДІЛ 1

### КОМБІНОВАНЕ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД

#### 1.1 Способів руйнування гірських порід

Необхідність зменшення енергоємності видобутку корисних копалин сприяла розвитку технологій руйнування ГП. До теперішнього часу розроблено достатньо способів комбінованого руйнування [14-64]. Більшість з них орієнтується на певні властивості ГП (крихкі або пластичні; міцні або м'які; щільні або пухкі тощо). Тому існує необхідність в розробці універсального способу руйнування ГП, що можливо застосовувати в широкому діапазоні ГП. Для вибору раціональної комбінації проведено аналіз механічних, немеханічних та комбінованих способів руйнування ГП. Головними критеріями аналізу є питома енергоємність руйнування ( $\text{кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3$ ), швидкість руйнування ( $\text{м} / \text{год}$ ), міцність ГП за шкалою М. М. Протод'яконова (в.о.), та вимоги щодо складу та фізико-механічних властивостей ГП.

**Вібраційне** руйнування ГП застосовується при міцності ГП за шкалою професора М. М. Протод'яконова  $f = 0,3 \dots 4$  в.о. [14]. Максимальна швидкість руйнування  $10 \text{ м} / \text{год}$  досягається лише в ГП міцністю  $f = 0,3 \dots 3$  в.о. [14]. Недоліком є обмеження по глибині руйнування  $20 \dots 30 \text{ м}$  [14]. З глибиною понад  $10 \text{ м}$  швидкість руйнування зменшується в 4 рази [15]. Максимальна енергоємність вібраційного руйнування  $13,0 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3$  [15]. Час, що витрачається на руйнування ГП складає не більше  $30 \%$ , решту часу займають спуско-підйомні, монтажні та допоміжні операції.

**Обертове** руйнування ГП із використанням шнеків доцільне в умовах ГП з міцністю  $f = 0,3 \dots 6$  в.о. [16]. При цьому швидкість руйнування ГП відповідно складає  $75 \dots 14 \text{ м} / \text{год}$  [16]. Перевагою обертового способу руйнування є безперервність процесу – одночасне руйнування та винесення зруйнованої ГП на поверхню. Ефективність досягається поєднанням осьового навантаження та



крутного моменту. Область застосування розширюється з використанням шарошкових ріжучих інструментів. Так в умовах ГП з  $f = 6 \dots 18$  в.о. швидкість станка СБШ 160/200-40 відповідно  $35 \dots 25$  м/год [16], а енергоємність руйнування в межах  $22 \dots 120$  кВт·год/м<sup>3</sup> [2]. Сучасні робочі інструменти шарошкового типу компанії «Sandvik» дозволяють руйнувати ГП з міцністю  $6 \dots 20$  в.о. за шкалою професора М. М. Протод'яконова [17]. При цьому швидкість руйнування сягає відповідно  $45 \dots 19$  м/год [17]. Безвідмовність твердосплавних різців робочого інструменту рівна  $1,5 \dots 15$  км погонних [17]. Недоліками зокрема шарошкового обертового руйнування ГП є конструктивна складність та дорожнеча ріжучого інструменту, його неремонтнопридатність. Близько 80 % [18] шарошкових доліт під час руйнування ГП з  $f = 12 \dots 16$  в.о. за шкалою професора М. М. Протод'яконова стають неприцездатними внаслідок зносу «лап». При цьому твердосплавні різці залишаються робочими.

Перевагами **ударного** руйнування ГП є можливість застосування в умовах ГП міцністю  $f = 8 \dots 18$  в.о. за шкалою професора М. М. Протод'яконова [14, 19]. Швидкість руйнування гранітів ударними перфораторними станками рівна  $0,6$  м/год [14]. Швидкість станків ударно-канатної дії БС-3 сягає  $1$  м/год [19], в умовах скельних ГП швидкість рівна  $0,4 \dots 0,7$  м/год [19]. Споживча потужність не перевищує  $100$  кВт [19]. Виходячи з цих даних, розрахована енергоємність станка сягає понад  $600$  кВт·год/м<sup>3</sup> при діаметрі свердловини  $450$  мм [19]. Недоліком є циклічність процесу (руйнування - виймання шматків ГП – руйнування).

Застосування пневмо-, гідроударників забезпечує **ударно-обертальне** руйнування ГП з міцністю за шкалою проф. М. М. Протод'яконова  $f = 8 \dots 20$  в.о. [20]. Швидкість руйнування станками СБУ-125 сягає  $7 \dots 9$  м/год [28] в ГП міцністю за шкалою професора М. М. Протод'яконова  $f = 2 \dots 4$  в.о. Енергоємність руйнування коливається в межах  $117 \dots 190$  кВт·год/м<sup>3</sup> при діаметрі свердловини  $60 \dots 100$  мм та швидкості руйнування  $6 \dots 8$  м/год [17]. Сучасні станки пневмоударної дії компанії «Atlas Copco» руйнують граніти з  $f = 9 \dots 12$  в.о. зі швидкістю  $40$  м/год [21]. Безвідмовність твердосплавних різців

робочого інструменту сягає 1...1,4 км погонних [21], а витрати пального 0,06 м<sup>3</sup>/год [21]. Відповідно енергоємність станків «Atlas Copco» у перерахунку сягає 950 кВт·год/м<sup>3</sup>. Недоліком пневмоударників є зниження працездатності в умовах пластичних та в'язких ГП [22].

До **абразивного** руйнування ГП відноситься гідропіскоструминна перфорація. Принцип дії полягає у використанні кінетичної енергії та абразивних властивостей суміші води з піском. Застосовується під час видобутку нафти, або газу для перфорації обсадних колон та продуктивних пластів. Абразивним матеріалом є кварцовий пісок фракцією 0,5...0,8 мм при концентрації у воді 50...100 кг/м<sup>3</sup> [23]. Швидкість подачі водно піскової суміші складає 200...260 м/с [23]. Компанії «Buckman Jet Drilling» вдалося досягти швидкості руйнування бетону на рівні 3...5 м/год [24]. До недоліків віднесено втрати кінетичної енергії потоку на тертя водо-піщаної суміші. В умовах м'яких порід формується каверна. По мірі її розширення утворюється зворотній потік рідини, який сповільнює активний струмінь.

**Вибухове** руйнування ГП поєднує наступні чинники: тиск, швидкість навантаження, температуру, електромагнітні коливання. Одним з недоліків є виділення шкідливих газів. Можлива небезпека несвоєчасної детонації. Згідно з [25], вибухове формування свердловини в умовах пористих доломітів ампульними зарядами ( $m = 40$  гр) забезпечило поглиблення вибою рівному 20 мм на один вибух. Діаметр свердловини при цьому коливався в межах 200...400 мм. Відповідно для руйнування одного метра свердловини необхідно 50 зарядів або 2 кг вибухової речовини (ВР). Тобто питомі витрати ВР сягають 28,60 кг/м<sup>3</sup>. Вибухове руйнування ГП також передбачає наступні закономірності [26]: зниження швидкості просування вибою з глибиною призводить до збільшення діаметра свердловини; діаметр свердловини у випадку ампульних зарядів у 3...4 рази більший ніж діаметр зарядів. Згідно з [2] енергоємність вибухового руйнування ГП у перерахунку сягає 136...410 кВт·год/м<sup>3</sup>, що майже в 2 рази більше у порівнянні з обертовим. При цьому швидкість руйнування рівна 10...15 м/год [2]. Область застосування

вибухового руйнування не обмежена. Експериментальні дослідження [27] свідчать про можливість руйнування ГП з міцністю  $f = 1 \dots 20$  в.о.

До переваг **гідравлічного** руйнування ГП відносять поточність процесу – руйнування та винесення зруйнованої ГП відбувається одночасно. Швидкість руйнування 60 м/год [28] досягається в суглинках та пливунах з  $f = 0,3 \dots 0,6$  в.о. Недоліком є обмеження глибини руйнування до 8 м [28]. Неефективність руйнування скельних ГП - швидкість руйнування гранітів з  $f = 13 \dots 16$  в.о. сягає  $0,03 \dots 0,06$  м/год при тиску води 135,0 МПа [29]. Швидкість руйнування бетону при тиску води 195,0 МПа та витратах  $3,12 \text{ м}^3/\text{год} - 0,34 \text{ м/год}$  [30]. При тиску 300,0 МПа та витратах води  $4,20 \text{ м}^3/\text{год}$  швидкість руйнування зростає до  $1,15 \text{ м/год}$  [30]. Витрати води сягають  $7,2 \text{ м}^3/\text{год}$  [31]. Стійкість трубопроводів при 70,0 МПа – 400 год., а при 350,0 МПа – 2 год [32]. Недоліком є необхідність використання потужних нагнітаючих насосів. Для створення тиску в 420,0 МПа потрібно дві паралельно працюючі насосні установки потужністю по 360 кВт [33]. Відповідно для руйнування суглинків необхідно створити тиск  $100 \dots 150$  МПа насосом потужністю 170 кВт. Так у перерахунку енергоємність руйнування суглинків рівна  $400 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^3$ . Зі зростанням міцності ГП енергоємність зростає гіперболічно і може сягати  $25 \text{ МВт} \cdot \text{год}/\text{м}^3$ . Ефективність руйнування (збільшення швидкості та тиску) без зростання енергоємності можливе зі зменшенням діаметра робочого інструмента. Так компанії «Buckman Jet Drilling» вдалося досягти швидкості руйнування пісковиків ( $\sigma_{\text{ст}} = 25 \text{ МПа}$ )  $270 \text{ м/год}$  [33]. При цьому струмінь води подавався під тиском 60 МПа, діаметр робочого інструменту 0,025 м, витрати води відповідно сягали  $2 \dots 8,4 \text{ м}^3/\text{год}$  [33]. Зростання тиску до 80 МПа забезпечує швидкість руйнування пісковиків до  $550 \text{ м/год}$  [33].

Для реалізації **гідромеханічного** руйнування ГП компанією «Флоу Індастріз» (США) розроблені гідромультіплікатори [34] у вигляді насадок на ріжучі інструменти. В результаті попереднього порушення цілісності масиву струменем води з тиском  $300,0 \dots 400,0 \text{ МПа}$ , зусилля на механічне різання зменшилося на 50 % [34]. Вартість прохідки знизилась на 30...50 % [34].

Швидкість проведення виробки зросла в 2 рази [34]. Проведені досліді на гранітах з  $f = 9...12$  в.о. встановили, що при створенні тиску в 420,0 МПа швидкість руйнування збільшилась в 1,5...2 рази [34] в порівнянні з механічним способом руйнування.

Інтенсифікація гідромеханічного руйнування можлива з використанням гідродинамічної кавітації [35]. Робочі інструменти з кавітаційним генератором реалізують частоту періодично зривної кавітації частотою до 5 кГц [35]. В порівнянні з обертовим руйнуванням енергоємність знизилась на 15...20 %, а швидкість зросла на 30...50 % [35]. Експериментальні дослідження проводились в умовах вапняків та доломітів [35]. В обводнених свердловинах частота гідродинамічних імпульсів впливає не безпосередньо на ГП, а на підземні води. Це призводить до зниження ефективності руйнування. Виникає необхідність застосовувати потужніші генератори, або попередньо осушувати свердловини.

Гідродинамічна кавітація також є основою **імплзійного руйнування** ГП [36]. Ідея полягає у створенні різкого перепаду тисків. На вибій подаються капсули з вакуумом всередині. Під час розриву капсул відбувається інтенсивне зхлопування вакуумної порожнини [36]. Рідина, що оточує вакуум під дією гідростатичного тиску збільшує швидкість та тиск [36]. Внаслідок подібних імпульсів відбувається руйнування ГП. Обов'язковими умовами реалізації імплзійного руйнування є обводненість вибою. Відповідно самостійний розрив капсул неможливий і необхідно застосовувати робочий інструмент механічної дії. Капсули подаються на вибій з промивною рідиною, різці ріжучого інструменту руйнують ГП і розривають капсули. При цьому виникають кавітаційні імпульси, що руйнують не тільки ГП, а й робочий інструмент. Спосіб імплзійного руйнування ГП не знайшов широкого застосування, тому в сучасній літературі відсутні данні, щодо результатів його впровадження.

Створення **гідротермічного** формування свердловин дозволило уникнути плавлення ГП, що відбувалось під час термічного руйнування. На вибій під

тиском нагнітається суміш газ-окисник, де вони змішуються. Система ініціювання підпалює суміш. Одночасно нагнітається вода, яка на вибої підігрівается до температури 1000...1300 К внаслідок горіння газів. В масиві ГП виникає градієнт температур, що викликає розтягуючі напруження. При цьому відбувається термічний зкол або лущення. Згідно з [37] швидкість гідротермічного руйнування граніту сягає 1,5 м/год, кварциту – 2,9 м/год, пісковика – 4,3 м/год. Діаметр свердловини коливався відповідно від 5,0 см до 4,6 см [37].

Як різновид гідравлічного руйнування ГП можливе застосування **гідроциклічного** впливу на вибій. Руйнування полягає в періодичності впливу холодних та гарячих рідин на ГП [38]. Почергова зміна температури викликає утворення напружень всередині ГП. При цьому формуються мікротріщини. В найслабших місцях на поверхні ГП відбувається термічний зкол. Перевагою гідроциклічного руйнування є розширення області застосування. Відомо [39], що в'язкі та пластичні ГП при зниженні температури стають крихкими. А вплив температур від 2000 К ефективно руйнує скельні ГП. Тому гідроциклічне руйнування може залишатися ефективним в умовах анізотропії масиву ГП. У літературі відсутні дані експериментальних досліджень гідроциклічного руйнування ГП. До недоліків віднесено необхідність холодильної установки та джерела нагрівання повітря/води разом з компресором.

**Електроімпульсне** руйнування ГП відбувається внаслідок електричного розряду (пробою) напругою до 200 кВ [40]. Характеризується швидкістю руйнування 6...10 м/год [40]. Недоліком є обмеженість застосування метаморфічними та виверженими породами, що мають питомий електричний опір не нижче 1...10 кОм·м [41]. Одночасно це є і перевагою, враховуючи, що магматичні та метаморфічні породи складають 90 % об'єму земної кори [41].

**Електрогідравлічне** руйнування ГП забезпечує формування гідравлічного удару внаслідок електричного розряду [42]. Під час руйнування м'яких ГП завдяки гідроімпульсній дії ущільнюються стінки свердловини. Тому формування свердловини можливе без додаткового кріплення її стінок.

При цьому можливе формування ядра ущільнення у вибої. Під час електрогідравлічного руйнування  $1 \text{ м}^3$  негабариту використовується 45 кДж енергії, а при вибуховому – 800 кДж [42]. Швидкість електрогідравлічного буріння гранітів сягає 1,2 м/год, залізної руди – 4,8 м/год, бетону на гранітному піску – 30 м/год [42]. Діаметр свердловини 40 мм, номінальна потужність 25 кВт [42]. Відповідно розрахункова питома енергоємність сягає  $4,15 \text{ МВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3$  для граніту,  $1,04 \text{ МВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3$  для залізної руди і  $0,16 \text{ МВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3$  для бетону. Застосування доцільне в умовах надміцних ГП оскільки міцність не впливає на ефективність руйнування електрогідравлічним способом [42]. Швидкість руйнування зростає, якщо ГП містить провідникові або напівпровідникові мінерали, має мілко кристалічну структуру [42].

Вплив **енергії лазера** викликає пружно-крихкі ознаки (лущення) деформації ГП або пластичні (плавлення та випаровування). Перехід від крихкого руйнування до плавлення супроводжується різким зростанням енергоємності в діапазоні  $135 \dots 594 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3$  [43]. Високотемпературне руйнування (плавлення) бетону лазером забезпечує просування вибою зі швидкістю 1,32 м/год [44] при діаметрі 2,5 мм. Недоліком високотемпературного руйнування є виникнення залишкового напруження внаслідок остигання ГП. Це призводить до формування тріщин та розколу зразка ГП. Тому під час формування свердловин плавленням додатково на вибій нагнітають холодильний агент. Недоліком низькотемпературного руйнування лазером є обмеженість глибини нагрівання ГП. Внаслідок цього крихкому руйнуванню (лущенню) підлягає тонкий шар на поверхні вибою. Для високотемпературного руйнування використовують вуглекислотні лазери безперервного випромінювання. Досліди показують, що енергоємність руйнування пісковиків  $\text{CO}_2$ -лазером коливається від  $0,7 \text{ МВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3$  (лущення) до  $8,1 \text{ МВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3$  (плавлення) [45]. Енергоємність руйнування сланців твердотілим лазером Nd:YAG в імпульсному режимі сягає від  $0,14 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3$  (лущення) до  $1,50 \text{ МВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3$  (лущення) [45]. Заявлена швидкість лазерного руйнування ГП рівна 324 м/год [45]. Міцність ГП не впливає на швидкість

лазерного руйнування, на відміну від механічного. При цьому тугоплавкість окремих мінералів, наприклад графіт, молібден, азбест знижує швидкість руйнування. Здебільшого ці мінерали характеризуються міцністю  $f = 3$  в.о., що є прийнятним для механічного руйнування. Тому розроблено комбіноване **лазерно-механічне** руйнування ГП [46]. Компанія «ForoEnergy» провела ряд експериментів, використовуючи волоконний лазер потужністю 20 кВт. Лазер розміщено в промивному каналі робочого інструменту з твердосплавними різцями. При діаметрі робочого інструменту 0,15 м швидкість руйнування граніту сягає 4 м/год [46], базальту 5 м/год [46], пісковика 6 м/год [46]. Енергоємність руйнування при цьому сягає 90...300 кВт·год/м<sup>3</sup> [46]. Хоча діаметр лазерного променя і обмежений, навколо утвореної свердловини формується тріщинуватість внаслідок градієнта температур. Тріщинуватість послаблює ГП та полегшує механічне руйнування. Представники компанії «ForoEnergy» (<http://www.foroenergy.com/>) заявляють, що під час лазерно-механічного руйнування зростає швидкість в 2...4 рази [46], зменшується вертикальне зусилля до  $< 4,5$  кН і обертальний момент  $< 400$  Н·м [46]. В обводненому середовищі енергія лазера буде витрачатись на нагрівання води. В умовах пластичних та в'язких ГП можливе закупорювання лазерної оптики.

**Плазмове** руйнування характеризується температурою до 5000 К [47] і ефективно в міцних ГП з  $f = 10...20$  в.о.. Плазма забезпечила руйнування залізистих кварцитів Криворізького басейну зі швидкістю 10-25 м/год при діаметрі свердловини 50 мм [47]. Розрахункова енергоємність рівна 2100...3950 кВт·год/м<sup>3</sup>. Швидкість руйнування гранітодіоритів 4,5 м/год при діаметрі свердловини 130 мм [47]. Розрахункова енергоємність сягає 1620...3000 кВт·год/м<sup>3</sup>. Витрати енергії пов'язані з розсіюванням теплової енергії, нагрівом ГП, розплавленням та випаровуванням. Відомо [48], що процес розплавлення та випаровування твердих тіл за фізичною природою еквівалентний механічному руйнуванню до молекулярного рівня. Відповідно енергоємність прямує до безкінечності.

**Термічне** або вогневе руйнування ГП забезпечує швидкість просування вибою 4...25 м/год [49]. Температура при цьому сягає 2000 К [49]. У якості палива застосовується керосин або бензин. Ефективність руйнування ГП залежить від вибору окисника. Використання стисненого повітря знижує собівартість руйнування ГП майже вдвічі [50]. На 20...25 % [50] знижується продуктивність руйнування в порівнянні з киснем. Підвищення ефективності досягається за рахунок попереднього підігрівання повітря. Підігрів здійснюється електродуговим способом, з використанням електричних горілок. Застосування електричної дуги для термічного руйнування дозволило використовувати інертні гази (водень, азот, аргон) у якості палива. Так компанія «Potter Drilling» (<http://www.potterdrilling.com/>) розробила експериментальну установку термічного руйнування [37]. Для вогняного струменю використовується водень [45]. Температура горіння сягає 2070 К [37]. Руйнування граніту здійснюється зі швидкістю 4 м/год при діаметрі свердловини 0,1 м [37].

Недоліками термічного руйнування є витрати палива на рівні 80...130 кг/год, повітря – 23...25 м<sup>3</sup>/год, кисню – 300...350 м<sup>3</sup>/год [51]. Максимальна глибина руйнування 18...23 м, а діаметр свердловини - 130 мм [51]. В умовах тріщинуватих ГП відбувається зниження швидкості руйнування на 25...30 % [51].

Відомі станки комбінованого **термомеханічного** (СБТМ-20, СБШ-20К) руйнування ГП. В умовах залізистих кварцитів швидкість руйнування сягає 8...10 м/год при діаметрі свердловини 200...220 мм [2]. Руйнування забезпечується попереднім послабленням вибою впливом термічних навантажень з послідовним руйнуванням ГП механічними засобами. Доведено [2], що при однакових умовах застосування швидкість термічного руйнування вибою співпадає зі швидкістю руйнування станками СБШ-250МН. Питома енергоємність термомеханічного руйнування в 25...30 разів [2] більша шарошкового.



**Звукові** коливання застосовують для інтенсифікації руйнування ГП конусними дробарками [52]. Результати дослідів свідчать про те, що без застосування звуку руйнівне зусилля складає 43,0 кН та досягається на 7-й секунді навантаження, а при звуковій інтенсифікації – 23,8 кН на 5-й секунді. Компанія «Boart Longyear» виготовляє сучасні установки LS-600, що поєднують обертове руйнування та звукові коливання [53]. Частота коливань сягає 150 Гц [54]. Перевагами є поєднання осевого зусилля, крутного моменту та звукових коливань, працездатність у будь-яких породах. Недоліки: відсутність промивної рідини призводить до перенагрівання робочого інструменту; необхідність спеціальної сталі для роботи з вібраціями; вартість руйнування ГП складає 210...240 у.о. на 1 метр свердловини [55]. Швидкість руйнування гранітів при частоті 60 Гц сягає 9 м/год [53].

Для **хімічного** руйнування ГП застосовують невибухові розширюючі суміші (НРС-1М, НРВ-80, MaxDinamitCement). Перевагою є безпека проведення робіт. Тиск, що утворюється під час розширення суміші складає 80,0...120,0 МПа [56]. Питомі витрати суміші - 8...16,7 кг/м<sup>3</sup> [57]. До недоліків віднесено: руйнівний ефект обмежений утворенням кількох магістральних тріщин; утворення тріщин відбувається в межах 12...20 год [57]; необхідність замкненого простору; обмеженість застосування в зимовий період. Хімічним знеміцнення ГП вивчали Ребіндер П. О. та Шрейнер Л. О [58]. Згідно з дослідями [58] встановлено, що 25 % водний розчин Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> на 25...30 % знижує міцність пісковики. Хімічне знеміцнення ГП застосовано під час буріння свердловин [58]. Швидкість **хіміко-механічного** руйнування гранітів із застосуванням 0,1 % розчину AlCl<sub>3</sub> зросла до 4,15 м/год, в порівнянні з 2,95 м/год під час механічного руйнування [58]. Проте руйнування ГП з використанням бурових розчинів обмежене у зв'язку з витратами на їх приготування, транспортування та зберігання. Крім цього доведено [59], що застосування продувки повітрям збільшує швидкість буріння в 2...3 рази в порівнянні з промивкою, стійкість різців зростає в 1,3...10 раз [59]. Інтенсивність охолодження твердосплавних різців в порівнянні з

використанням промивного розчину більша [59]. Загальна вартість буріння з продувкою нижче на 50 % [59].

Відоме **хіміко-гідравлічне** формування свердловин з допомогою водяного розчину соляної кислоти (HCl). Принцип дії полягає в нагнітанні розчину HCl під тиском  $< 40$  МПа в ГП [60]. Швидкість руйнування доломітів та вапняків в Тімано-Печорській провінції (Росія) сягає 6...60 м/год, при витратах кислоти  $5 \text{ м}^3$  на 1 погонний метр свердловини [61]. При цьому застосовано 15...30 % розчин HCl. Для формування нафтодобувних свердловин у Кувейті та Оклахомі (США) використано 10...15 % розчин HCl. Швидкість руйнування вапняків сягала відповідно 14 та 27 м/год [62]. До недоліків хіміко-гідравлічного руйнування відносять обмеженість області застосування карбонатними ГП (кальцити, доломіти, вапняки). Ефективність руйнування залежить від пористості та проникаючої здатності ГП. На якість реакції впливає температура середовища. Чим вища температура тим краще розчиняється ГП [60]. Рівень реакції збільшується вдвічі з кожним зростанням температури на 265 К [60].

Результати аналізу механічних та немеханічних способів руйнування ГП винесено до таблиці 1.1. Основним чинником є енергоємність руйнування ГП в залежності від джерела навантаження. Разом з цим наявність швидкості руйнування та допустимої твердості ГП дозволяють оцінити ефективність руйнування.

Проаналізувавши механічне руйнування ГП, найбільшою енергоємністю характеризується ударно-обертовий спосіб. Це пов'язано з роботою пневмоударника, додатково до осевого навантаження та крутного моменту. Тому запропоновано замінити роботу пневмоударника джерелом фізичних навантажень, щоб забезпечити фізико-механічне руйнування ГП.

Згідно з даними таблиці, енергія вибуху здатна руйнувати ГП з міцністю від 1 до 20 за шкалою професора М. М. Протод'яконова. Енергоємність  $136...410 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3$  [2] є одним з найменших показників серед немеханічних

способів руйнування. Разом з цим масова реалізація вибухового буріння обмежена швидкістю 10...15 м/год [25] та витратами ВР 28,60 кг/м<sup>3</sup> [25].

Таблиця 1.1

**Порівняння способів руйнування гірських порід**

Спосіб руйнування	Енергоємність, кВт·год/м <sup>3</sup>	Швидкість буріння, м/год	Твердість ГП, в. о.
Механічні способи руйнування гірських порід			
Вібраційний	13	10	0,3...4
Обертовий	22...120	19...45	до 20
Ударний	90	0,4...1	8...18
Ударно-обертовий	950	40	8...20
Немеханічні способи руйнування гірських порід			
Абразивний	-	3...5	5...20
Вибуховий	136...410	10...15	1...20
Гідравлічний	400	60	0,3...0,6
Гідромеханічний	-	≈ 40...90	9...12
Гідротермічний	-	1,5...9	10...20
Гідроциклічний	-	-	1...20
Електроімпульсний	80...1940	6...10	10...20, мілкозернисті, крихкі, анізотропні
Електрогідравлічний	166...4000	1,2...30	10...20
Імплозійний	-	-	-
Лазерний	135...594	1,32	10...20
Лазерно-механічний	90...300	4...6	10...20
Плазмовий	1620...3950	10...25	10...20
Термічний	-	4...25	10...20
Термодетонаційний	-	-	-
Термомеханічний	660...3600	8...10	10...20
Термохімічний	-	-	10...20
Ультразвуковий	-	9	10...20
Хімічний	-	-	кальциті, доломіти, вапняки
Хіміко-гідравлічний	-	6...60	кальциті, доломіти, вапняки

Аналіз підтвердив доцільність розробки вибухо - механічне руйнування ГП, де обертове руйнування доповнюється вибуховим. Принцип дії полягає в формуванні внесеної технологічної тріщинуватості енергією вибуху, додатково

до існуючої природної, утворюючи передруйнівну область на вибої. При цьому ріжучий інструмент механічної дії руйнує ГП, послаблену комплексною тріщинуватістю. В результаті досягається зниження питомої енергоємності механічного руйнування і можливість руйнування ГП з різними фізико-механічними властивостями.

Під час дослідів [63] виявлено, що співвідношення маси зруйнованої ГП до маси ВР збільшується зі зростанням глибини вибою. Це свідчить про ефективність вибухового руйнування зі зростанням геостатичного тиску. Для реалізації вибухо-механічного руйнування ГП можливе використання як звичайних так і модифікованих робочих інструментів механічної дії. Для цього розроблено вузол подачі зарядів ВР до вибою. Основні його характеристики наведені у розділі 2. Важливою розробкою також є систему безпечної та надійної ініціації вибуху. У випадку не спрацювання детонатора передбачено заряди ВР з пневмодетонатором. Все це враховано під час проектування експериментального пристрою.

Особливу увагу приділено техніці безпеки вибухо – механічного руйнування ГП, та зберіганню касет з зарядами ВР. Законом України [64] передбачені правила безпеки поводження з вибуховими матеріалами під час підготовки та проведення вибухових робіт. Ці правила повністю відповідають вимогам вибухо-механічного руйнування ГП. Оскільки вибух суміщено з механічним руйнуванням рекомендовано дотримуватись загальних правил безпеки. А саме: оператор установки вибухо-механічного руйнування та робочі повинні бути одягнені в спецодяг та мати захисні пристосування (каски, рукавиці, взуття, захисні окуляри). Під час проведення вибухо - механічних робіт оператор установки та робочі обслуговуючої бригади повинні знаходитись на спеціально відведених для них місцях, розділ 5. Заборонено допускати на місце проведення робіт сторонніх осіб. Категорично заборонено залишати працююче обладнання без нагляду. Варто урахувати, що відповідальність несуть майстер-підричник та оператор промислової установки

вибухо-механічної дії. Детальні вимоги з техніки безпеки під час вибухо-механічного руйнування ГП наведено у розділі 5.

## 1.2 Класифікація комбінованого руйнування

Для класифікації комбінованого руйнування ГП застосовано теорію графів [65]. Це дозволило визначити і оцінити кількість можливих комбінацій, швидко виділити необхідну комбінацію та спланувати розробку нової. Також графи дозволяють розташовувати способи руйнування в певній послідовності, або групувати їх у класи за певною ознакою.

Обрано орієнтовний граф Тудора Замфіреску з 12-ма вузлами, рис. 1.1.

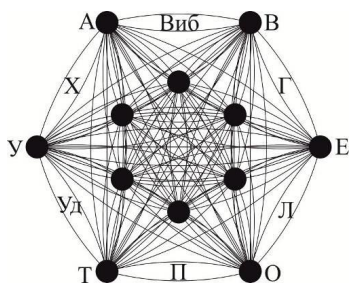


Рис. 1.1. Орієнтовний граф Тудора Замфіреску для класифікації комбінованого руйнування гірських порід (А – абразивне руйнування; Виб – вибухове; В – вібраційне; Г – гідравлічне; Е – електроімпульсне; Л – лазерне; О – обертове; П – плазмове; Т – термічне; Уд – ударне; У – ультразвукове; Х – хімічне)

Обраний граф дозволяє кожній вершині формувати максимальну кількість зв'язків рівну 11. Форма графа дає можливість доповнювати його новими вершинами, зберігаючи максимальну кількість зв'язків. Вершини відповідають одиничному навантаженню (механічному або немеханічному), що

руйнує ГП. Нестрого паралельні дуги графа сполучають між собою вершини в двох напрямках, формуючи подвійні комбінації з кожною парою вершин.

Для визначення можливих комбінацій способів руйнування ГП побудовано бінарну матрицю до графу, рис. 1.2. По горизонталі та вертикалі розташовані скорочені назви одиничних навантажень, що руйнують ГП. На перетині вертикальних та горизонтальних ліній формуються комбінації одиничних способів руйнування ГП. Згідно з бінарною матрицею руйнування ГП можливе 132 комбінаціями одиничних навантажень: механічний-механічний, механічний-немеханічний, немеханічний-немеханічний.

	А	Виб	В	Г	Е	Л	О	П	Т	Уд	У	Х
А	А	А-Виб	А-В	А-Г	А-Е	А-Л	А-О	А-П	А-Т	А-Уд	А-У	А-Х
Виб	Виб-А	Виб	Виб-В	Виб-Г	Виб-Е	Виб-Л	Виб-О	Виб-П	Виб-Т	Виб-Уд	Виб-У	Виб-Х
В	В-А	В-Виб	В	В-Г	В-Е	В-Л	В-О	В-П	В-Т	В-Уд	В-У	В-Х
Г	Г-А	Г-Виб	Г-В	Г	Г-Е	Г-Л	Г-О	Г-П	Г-Т	Г-Уд	Г-У	Г-Х
Е	Е-А	Е-Виб	Е-В	Е-Г	Е	Е-Л	Е-О	Е-П	Е-Т	Е-Уд	Е-У	Е-Х
Л	Л-А	Л-Виб	Л-В	Л-Г	Л-Е	Л	Л-О	Л-П	Л-Т	Л-Уд	Л-У	Л-Х
О	О-А	О-Виб	О-В	О-Г	О-Е	О-Л	О	О-П	О-Т	О-Уд	О-У	О-Х
П	П-А	П-Виб	П-В	П-Г	П-Е	П-Л	П-О	П	П-Т	П-Уд	П-У	П-Х
Т	Т-А	Т-Виб	Т-В	Т-Г	Т-Е	Т-Л	Т-О	Т-П	Т	Т-Уд	Т-У	Т-Х
Уд	Уд-А	Уд-Виб	Уд-В	Уд-Г	Уд-Е	Уд-Л	Уд-О	Уд-П	Уд-Т	Уд	Уд-У	Уд-Х
У	У-А	У-Виб	У-В	У-Г	У-Е	У-Л	У-О	У-П	У-Т	У-Уд	У	У-Х
Х	Х-А	Х-Виб	Х-В	Х-Г	Х-Е	Х-Л	Х-О	Х-П	Х-Т	Х-Уд	Х-У	Х

Рис. 1.2. Бінарна матриця комбінованого руйнування гірських порід

В результаті аналізу для подальшого дослідження обрано вибухо-механічне руйнування ГП. Енергія вибуху поєднає наступні руйнівні чинники: тиск до 40 ГПа [66], температуру до 5000 К [66], швидкість навантаження до 10 км/с [66]. Відомо [66], що під час вибуху виникають електромагнітні коливання внаслідок електрокінетичного явища. Згідно з [67] частота електромагнітних коливань продуктів детонації сягає діапазону  $\approx$  від 300 ГГц до 300 ПГц. Тиск вибухової хвилі, як і будь-яке механічне навантаження формує ядро ущільнення ГП. Але енергія вибуху є хвилеподібною і тиск має динамічні ознаки – вплив з певною частотою (ефект перфоратора). Таким чином кожне

максимальне навантаження чергується його падінням, під час якого ГП знеміцнюється і руйнується.

Відомо [68], що зі зростанням швидкості навантаження пластичні деформації не встигають реалізуватись. Тому навіть пластичні тіла мають ознаки крихкого руйнування. Так, енергія вибуху залишатиметься ефективною в умовах прошарків в'язких та пластичних ГП. Обводненість ГП також є перевагою вибухо-механічного руйнування. Під час вибуху зарядів ВР в обводненому просторі виникає гідроудар [69], який діє на поверхні тріщин, заповнених водою. Встановлено [69], що гідровибух дозволяє знизити витрати ВР в 5...6 разів зі збереженням ефекту вибуху. Також можливе збільшення ефективності вибуху при одночасній наявності гідрозабійки та обводненості вибою [69]. У випадку вибухо-механічного руйнування ГП гідрозабійка реалізується тиском стисненого повітря в продувному каналі. Проведені експерименти [70] підтверджують, що міцність аргіліту зменшується в 2,0 рази внаслідок водонасичення.

Температура продуктів детонації безпосередньо не несе руйнівного ефекту. Різке підвищення температури призводить до підвищення руйнівних чинників: тиску та швидкості вибухової хвилі. Крім того вплив температури під час вибуху є імпульсним, разовим і протікає за частки секунди. Тому теплова енергія в якості самостійного руйнівного чинника не встигає реалізуватись. Згідно з [67] температура кумулятивного струменю не перевищує 1000 К, що нижче температури плавлення більшості мінералів [41].

Електромагнітні коливання забезпечують руйнування ГП на мікроскопічному рівні. Відомо [71], що кристалічні решітки мінералів ГП мають власну частоту коливань, що не перевищує 10 ТГц. Наприклад гексагональна кристалічна решітка кварцу має ковалентний полярний зв'язок. Тобто атоми пов'язані між собою електронними парами. Електрони здійснюють власні коливання та мають електричний заряд. Відповідно формують навколо себе електромагнітне поле. Електромагнітні коливання продуктів детонації вступають в субрезонанс / резонанс з власними коливаннями електронних пар.

Відбувається «розхитування» міжатомних зв'язків, що призводить до їх розриву. Внаслідок цього утворюються дефекти кристалічної решітки та мікротріщини у ГП.

Незважаючи на енергетичні показники вибухової хвилі, актуальним завданням щодо удосконалення вибухо - механічного руйнування є забезпечення керованості вибуху. Тобто спрямування енергії вибуху перпендикулярно до вибою ураховуючи конструктивні вимоги ріжучого інструменту комбінованої дії.

Руйнування ГП лише вибухом вимагає витрат ВР на рівні  $28 \text{ кг/м}^3$  [25]. Тому запропоновано енергію вибуху використовувати лише для формування технологічної тріщинуватості, додатково до природної. Послідує руйнування ГП забезпечить робочий інструмент механічної дії. Для зниження питомих витрат ВР зі збереженням руйнівного ефекту вибуху використано кумулятивне облицювання, розділ 4. Так реалізується концентрація енергії вибуху перпендикулярно до вибою.

### **1.3 Вибухо-механічне руйнування**

Реалізація комбінованого руйнування полягає в одночасному впливі вибухових та механічних навантажень. Аналіз вітчизняної та зарубіжної літератури свідчить про відсутність даних щодо промислового застосування вибухо-механічного руйнування ГП. Існують патенти США [72, 73, 74], які вперше запропонували поєднання вибухових на механічних навантажень для руйнування ГП. В результаті ознайомлення виявлено ряд недоліків, які виправлено в запропонованому способі. Відомий патент [72] пропонує комбіноване руйнування ГП, що включає введення до вибою потоком промивної рідини розчинних у воді капсул. Капсули містять ВР, яка під дією тиску робочого інструменту забезпечує мініатюрні вибухи на вибої. Зазначений спосіб дає змогу послабити масив ГП та полегшити механічне руйнування



вибою. Недоліки: розсіювання енергії вибуху; вплив енергії вибуху на коронку ріжучого інструменту механічної дії.

Наступний патент [73] передбачає руйнування ГП, внесенням зарядів ВР до вибою по промивному каналу з послідуочим їх вибухом. Даний спосіб передбачає направленість дії енергії вибуху за рахунок конусних виїмок в корпусі зарядів. При цьому доставка зарядів до вибою ускладнена конструкцією робочого інструменту шарошкового типу. Розташування зарядів обмежує область впливу енергії вибуху контуром виробки.

Третій патент щодо комбінованого вибуху - механічного руйнування ГП [74] включає введення зарядів ВР по промивному каналу до вибою. Детонацію зарядів забезпечують п'єзоелектричні елементи. Внаслідок цього відбувається подрібнення ГП вибухом з послідуочим механічним оконтуренням вибою та виносом зруйнованої ГП на поверхню потоком промивної рідини. Основним недоліком є те, що концентрація вертикального напрямку вибухової хвилі забезпечується її відбиванням від різців робочого інструменту. Це спричиняє розсіювання енергії вибуху, та відповідно, знижує ефективність ВР. Крім цього, основним руйнівним чинником є енергія вибуху, а різці лише надають вибою округлої форми, зрізуючи породу по контуру свердловини.

Запропоновано руйнування ГП комбінованими вибухо-механічними навантаженнями. Відрізняється від відомих тим, що з часовим випередженням формується технологічна тріщинуватість вибою КВЯ. Після чого забезпечується механічне руйнування вже послабленого масиву по всій площі. Сукупність природної та технологічної тріщинуватостей послаблює міцність ГП. Внаслідок чого зменшуються питома енергоємність руйнування та термін дії ріжучого інструменту внаслідок його меншого навантаження. Отже ідеєю роботи є знеміцнення ГП внесеною тріщинуватістю керованим КВЯ.

## Висновки

1. Визначено спільні недоліки відомих способів руйнування гірських порід:

- необхідність певного хімічного складу гірських порід (карбонатні, залізисті тощо), або фізико-механічних властивостей гірських порід (пористі, крихкі, в'язкі тощо);

- при зростанні питомої енергоємності до  $4,0 \text{ МВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3$  виникає надмірне подрібнення гірських порід, що потребує зростання витрат енергії.

2. Обґрунтовано застосування запропонованої класифікації на орієнтовному графі Тудора Замфіреску, яка дозволила виділити та проаналізувати 132 комбінації способів руйнування гірських порід.

3. Доведена доцільність розробки енергоощадного способу руйнування гірських порід з формуванням кумулятивного вибухового ядра, що характеризується наступними чинниками: тиском продуктів вибуху до 40 ГПа; швидкістю навантаження до 10 км/с, температурою детонації до 5000 К та електромагнітними коливаннями 300...300 ПГц

4. Результати досліджень за розділом опубліковано в: [75] - проведено системний аналіз способів комбінованого руйнування ГП, виділено їх недоліки та переваги; [76] – визначено енергетичні параметри кумулятивного вибухового ядра.

## РОЗДІЛ 2

### ПЛАНУВАННЯ ВИБУХО - МЕХАНІЧНОГО РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД

#### 2.1 Композиційний план вибухо-механічного руйнування

Для експериментальної апробації вибухо – механічного руйнування ГП обрано крок варіювання змінних; необхідну та достатню кількість, послідовність експериментів. Метою експериментальної апробації є визначення оптимальних значень чинників вибухо-механічного руйнування ГП, які б забезпечили послаблення вибою комплексною тріщинуватістю.

У якості параметра оптимізації обрано питому енергоємність руйнування ГП комбінованими вибухо-механічними навантаженнями. Задачею оптимізації є оцінка зниження енергоємності руйнування ГП.

Чинники, які впливають на експеримент та забезпечують наступні вимоги [77]:

- керованість (чинник повинен змінюватися лише за вимогою);
- операціональність (приймає значення за визначену послідовність дій);
- точність (повинен визначатись точно);
- однозначність (чинники не повинні залежати один від одного).

На енергоємність руйнування ГП вибухо – механічними навантаженнями впливають наступні групи чинників: фізико-механічні властивості ГП (межа міцності на стиснення, щільність, модуль пружності I роду, коефіцієнт тріщинуватості); властивості КВЯ (тиск та швидкість навантаження, температура, частота навантажень), властивості заряду ВР (маса та тип ВР, щільність, форма та матеріал кумулятивного облицювання), властивості ріжучого інструменту вибухо-механічної дії (тип конструкції, геометрія та матеріал різців), властивості механічного руйнування (зусилля подачі, кутова швидкість).

З перелічених чинників обрано наступні:

–  $x_1$  – межа міцності на стиснення ГП, Па – дала змогу встановити область застосування вибухо-механічного руйнування ГП;

–  $x_2$  – частота навантажень вибою КВЯ (Гц) та температура вибуху (К) – дозволили оцінити доцільну питому витрату ВР та встановити необхідність її зміну відповідно.

Проаналізовано відповідність чинників описаним вимогам:

1. Межа міцності на стиснення ГП регулюється зміною ГП. Визначається експериментально згідно з ГОСТ 30629-99 (розділ 4). Не залежить ні від температури вибуху ні від частоти навантажень вибою КВЯ. Межа міцності на стиснення вимірюється пресом гідравлічним з зусиллям 100...500 кН та з максимальною похибкою 2 %.

2. Частота навантажень вибою КВЯ регулюється оператором за матрицею планування експерименту. Визначається кількістю проведених вибухів у вибої. Не залежить від межі міцності ГП на стиснення та температури вибуху.

3. Температура вибуху змінюється зі зміною типу ВР. Визначається розрахунково. Не залежить від межі міцності ГП на стиснення та частоти навантажень вибою КВЯ.

Для застосування методу оптимізації забезпечено наступне:

- задано набір чинників: межа міцності ГП на стиснення, частота навантажень вибою КВЯ, температура вибуху;

- встановлена область зміни обраних чинників, таблиця 2.2;

- задано обмеження чинників, розділ 4;

- визначено поліноміальний вид цільових функцій, розділ 4.

У якості цільових функцій обрано залежність питомої енергоємності руйнування ГП від частоти навантажень вибою КВЯ та температури вибуху.

Відповідність вимогам [77] параметра оптимізації: *кількісний* - визначається за показниками вольтметра, амперметра, фіксатора часу та об'єму ГП, що руйнується; зміна параметру виражається *одним числом* у кВт·год/м<sup>3</sup>; *статистична однозначність* – параметр оптимізації змінюється зі зміною

значень межі міцності на стиснення, частоти навантажень вибою КВЯ та температури вибуху; *ефективна оцінка функціонування системи* – коли оптимізація одного параметра вичерпана, можливе послідовне вивчення інших параметрів (швидкість, продуктивність руйнування ГП тощо); *універсальність* – параметр визначає економічність системи напряму - витрати електроенергії, та опосередковано - швидкість та продуктивність руйнування ГП; *фізичний зміст* – параметр легко визначити та зрівняти з реальними характеристиками системи.

Вимоги до математичної моделі [78]: *точність передбачення (адекватність)* - не повинна залежати від напрямку досліджень; *простота (аналітичність)*. Оскільки обрані чинники варіюють на трьох рівнях застосовано ортогональний центральний композиційний план (ОЦКП), який описує поверхні 2-го порядку. Хоча температура вибуху і не залежить від частоти навантажень КВЯ, проте поява одного чинника без іншого неможлива. Тому вирішено планування поділити на дві частини: 1 – визначити вплив частоти навантажень КВЯ  $e=f(v)$  на енергоємність руйнування ГП; 2 – визначити вплив температури вибуху  $e=f(T)$ . Один ОЦКП при двох чинниках та трьох рівнях варіювання потребує 9 експериментів. При двох ОЦКП сумарна кількість різних експериментів рівна 15, оскільки 3 з них дублюються. Плани другого порядку дозволяють провести експеримент для відшукування рівняння регресії, що містить другі ступені чинників [77]:

$$\hat{Y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{\substack{i,u=1 \\ i \neq u}}^k b_{iu} x_i x_u + \dots \quad (2.1)$$

ЦКП складається з ядра - план  $2^k$  ПЧЕ, зіркових точок  $2^k$  (по дві для кожного чинника), центральної точки. В таблиці 2.1 наведено планування вибухо-механічного руйнування ГП в умовних змінних [77].

Таблиця 2.1

**Матриця планування для  $e=f(v)$  та  $e=f(T)$  в умовних змінних**

Номер експерименту		$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1 \cdot x_2$	$x_1^2$	$x_2^2$	$Y$
1		2	3	4	5	6	7	8
Ядро плану ПЧЕ $2^k$	1	+1	-1	-1	+1	1/3	1/3	$Y_1$
	2	+1	+1	-1	-1	1/3	1/3	$Y_2$
	3	+1	-1	+1	-1	1/3	1/3	$Y_3$
	4	+1	+1	+1	+1	1/3	1/3	$Y_4$
Зіркові точки $2 \cdot k$	5	+1	-1	0	0	1/3	-2/3	$Y_5$
	6	+1	+1	0	0	1/3	-2/3	$Y_6$
	7	+1	0	-1	0	-2/3	1/3	$Y_7$
	8	+1	0	+1	0	-2/3	1/3	$Y_8$
Центральна точка	9	+1	0	0	0	-2/3	-2/3	$Y_9$

При двох чинниках модель функції відгуку другого порядку описується в загальному вигляді рівнянням:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 \quad (2.2)$$

Обрано рівні та інтервали варіювання головних чинників ( $\sigma$ ,  $v$ ,  $T$ ), що зведено до таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

**Рівні та інтервали варіювання чинників**

Найменування чинників	Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	-1	0	+1	
1	2	3	4	5
Частина 1				
$x_1$ - межа міцності на стиснення $\sigma$ , МПа	130	180	220	$\approx 45$
$x_2$ - частота навантажень кумулятивним вибуховим ядром на вибій $v$ , Гц	0	0,2	0,4	0,2
Частина 2				
$x_1$ - межа міцності на стиснення $\sigma$ , МПа	130	180	220	$\approx 45$
$x_2$ - температура вибухів $T$ , К	0	2741	3436	$\approx 695$

У відповідності до матриці планування, встановлено залежність питомої енергоємності руйнування ГП  $e$  (кВт·год/м<sup>3</sup>) від межі міцності ГП на стиснення  $\sigma$  (МПа), частоти навантажень КВЯ  $v$  (Гц), температури вибуху  $T$  (К):  $e=f(v, T)$ .

## 2.2 Обладнання вибухо-механічного руйнування

Для реалізації комбінованого руйнування ГП вибухо – механічними навантаженнями розроблено пристрій за схемою на рис. 2.1. Пристрій є повнорозмірним, що дозволяє використання його елементів на промислових установках. Виконання пристрою можливе як у вертикальному положенні так і горизонтальному та похилому. На пристрої перевірено аналітичні залежності: питомої енергоємності руйнування ГП від частоти навантажень вибою КВЯ та температури вибуху.

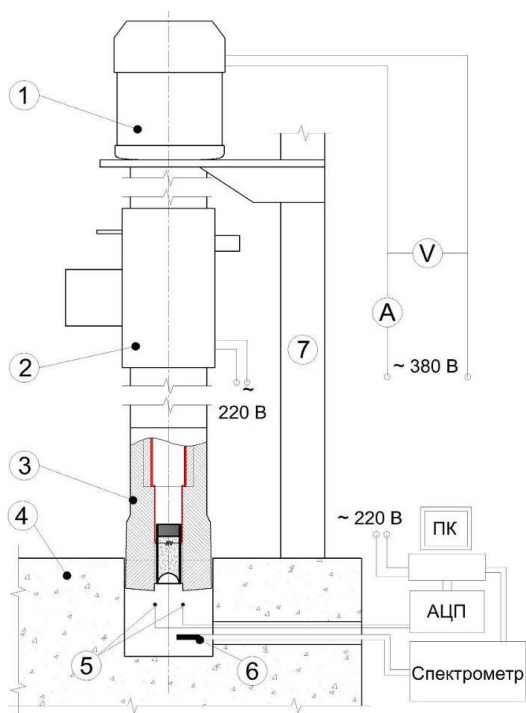


Рис. 2.1. Схема пристрою вибухо-механічного руйнування гірських порід: 1 – електродвигун; 2 – вертлюг модифікований; 3 – ріжучий інструмент комбінованої дії; 4 – зразок гірської породи; 5 - контакти електродів; 6 – волокно оптичне в корпусі захисному металевому; 7 – елементи каркасу

Принцип дії пристрою полягає в наступному: під час руйнування ГП ріжучим інструментом комбінованої дії 3 з вертлюга модифікованого подається заряд ВР до вибою. Далі відбувається детонація заряду, формування КВЯ, що формує внесену технологічну тріщинуватість у вибої додатково до природної. Комплексна тріщинуватість послаблює ГП при цьому знижується питома енергоємність вибухо-механічного руйнування вибою.

Технологія проведення вибухо-механічного руйнування ГП пояснюється блок-схемою, рис. 2.2.

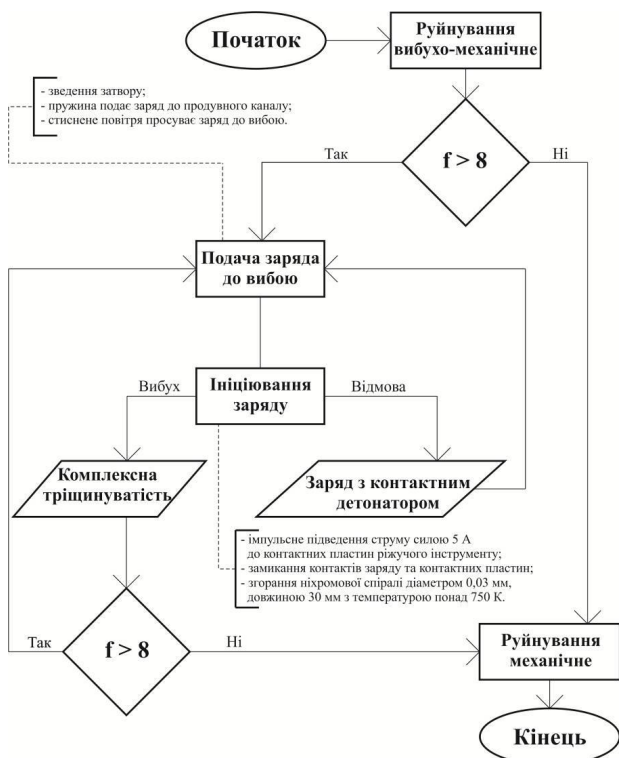


Рис. 2.2. Блок-схема вибухо-механічного руйнування гірських порід

В умовах м'яких ГП відбувається руйнування різанням, при  $f < 8$  за шкалою професора М. М. Протод'яконова. Міцність ГП визначається залежно



від швидкості просування вибою. Згідно з [79], для твердосплавних ріжучих інструментів міцність  $f < 8 \dots 12$  відповідає просування вибою зі швидкістю  $\geq 36$  м/год. В умовах міцних ГП з  $f > 8$  за шкалою професора М. М. Протод'яконова, забезпечується подача та детонація зарядів ВР на вибій з формуванням КВЯ. В результаті вибій послаблюється, утворенням комплексної тріщинуватості. Це призводить до зниження питомої енергоємності руйнування та зростання швидкості руйнування ГП, дивись розділ 4, 5. У разі зростання швидкості руйнування ГП, заряди ВР не подаються до вибою. Якщо швидкість руйнування  $< 36$  м/год, продовжується подача зарядів ВР для забезпечення вибухо-механічного руйнування ГП. У випадку відмови детонації до продувного каналу подається заряд з контактним детонатором. В результаті детонації заряду продувний канал звільняється від зарядів і вибухо-механічне руйнування продовжується.

Для концентрації вибухової хвилі на вибій (ефект Манро [67]) створено конструкцію заряду ВР, рис. 2.3. Ефект Манро забезпечує підсилення дії вибуху за рахунок концентрації енергії вибуху перпендикулярно до вибою [67].

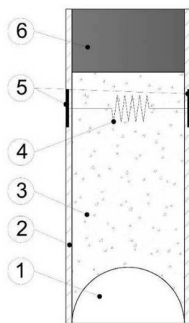


Рис. 2.3. Заряд вибухової речовини для реалізації вибухо-механічного руйнування гірських порід: 1 – облицювання; 2 – корпус; 3 – вибухова речовина; 4 – електронний запал; 5 – електродне кільце; 6 – забійка

Ефект Манро забезпечується влаштуванням облицювання 1 в нижній частині заряду. Так зростає ефективність використання енергії вибуху та знижується питомі витрати ВР, розділ 5. Відомо [80], що під час руйнування скельних ГП накладними зарядами питома витрата ВР знижується з 2...3 кг/м<sup>3</sup> до 0,25...0,4 кг/м<sup>3</sup> за наявності кумулятивного облицювання. Електронний запал 4 та електродне кільце 5 забезпечують ініціювання заряду ВР всередині ріжучого інструменту комбінованої дії, рис. 2.3. Корпус 2, забійка 6 разом з тиском стисненого повітря в продувному каналі підвищують активну масу заряду.

Для збільшення швидкості та тиску КВЯ під час використання ефекту Манро конструкцію заряду виконано наступним чином, рис. 2.4. Від вище згаданого заряду ВР (рис. 2.3) дана конструкція відрізняється наявністю буферної речовини 2, відокремленою від конденсованої ВР діафрагмою 3. Так забезпечується відоме явище [81] градієнтного прискорення ударних хвиль.

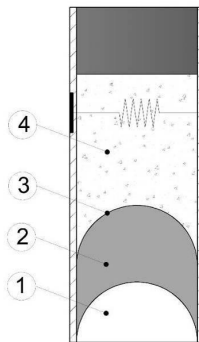


Рис. 2.4. Конструкція заряду каскадного типу для реалізації вибухо-механічного руйнування гірських порід: 1 - облицювання; 2 – буферна речовина; 3 – діафрагма; 4 – конденсована вибухова речовина

Принцип дії таких зарядів полягає в каскадному ініціюванні конденсованої ВР 4 та буферної речовини 2. Застосування циліндричних та напівсферичних зарядів каскадного типу дозволяє збільшити тиск ударної хвилі

до 20 ГПа [81], а швидкість до 50 км/с [81]. Верхня частина заряду заповнена конденсованою ВР 4, наприклад суміш  $Mg + KClO_4$ , нижня частина – буферною речовиною 2, наприклад метаном  $CH_4$ . Щільність більшості конденсованих ВР 1000 ... 2000 кг/м<sup>3</sup> [82], а при детонації вона зростає майже в 1,5 рази [83]. Щільність метану ( $CH_4$ ) 0,71 кг/м<sup>3</sup> [84], що забезпечує область пониженого тиску під конденсованою ВР. Відповідно виникає градієнт тисків, коли відбувається послідовне співударяння шарів ВР та горючого газу. Вибухова хвиля з підвищеним тиском прямує до буферної зони з газом пониженого тиску. Послідуюче займання газу підсилює ударну хвилю, а облицювання концентрує енергію вибуху на вибій.

Для подачі зарядів ВР до промивного каналу розроблено конструкцію вертлюга модифікованого, рис. 2.5.

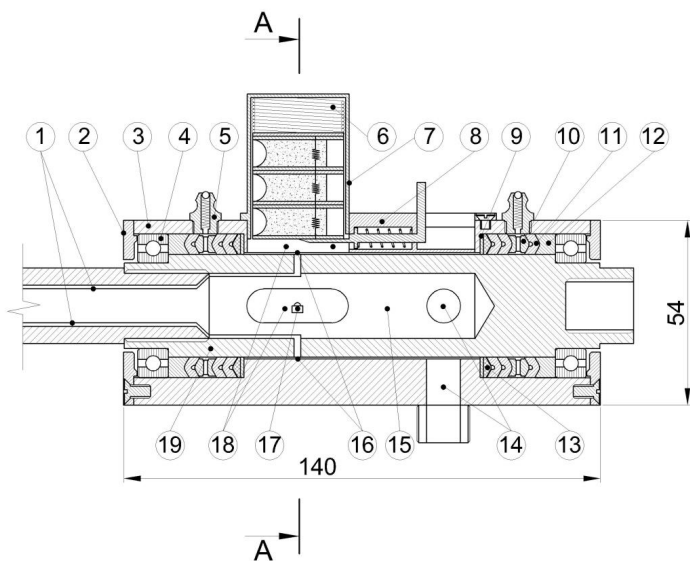


Рис. 2.5. Вертлюга модифікований для реалізації вибухо-механічного руйнування: 1 – струмопровідні дроти (220 В); 2 – кришка вертлюга; 3 – корпус вертлюга; 4 – підшипник 25x42x9 мм (ГОСТ 8338-75); 5 – прес-маслянка 1.1 Ц6 (ГОСТ 19853-74); 6 – пружина подавача зарядів вибухової речовини; 7 - касета з зарядами вибухової речовини; 8 – затвор; 9 – кільце металеве; 10 – кільце для

змащення підшипників; 11 – шевронна манжета (ГОСТ 22704-77); 12 – кільце нажимне (ГОСТ 22704-77); 13 – кільце опорне (ГОСТ 22704-77); 14 – отвори для нагнітання стисненого повітря; 15 – продувний канал; 16 – контакти струмопровідних дротів 1; 17 – електрод з контактною пластиною, що живиться від мережі 220 В; 18 - отвори для подачі заряду вибухової речовини до продувного каналу 15; 19 – вал вертлюга

До вертлюга приєднано касету 7 з зарядами ВР. За необхідністю подачі заряду ВР до продувного каналу 15, зводиться затвор 8. Далі пружина подавача 6 подає заряди ВР до отвору 18. При цьому відбувається нагнітання стисненого повітря в отвори 14. Під тиском стисненого повітря заряд ВР просувається до вибою.

Механізм подачі зарядів ВР пояснює рис. 2.6. Під час зведенні затвору 7 заряд під дією тиску пружини 1 потрапляє до продувного каналу 5, рис. 2.6. Повертаючись у початкове положення, затвор 7 перериває подачу наступного заряду.

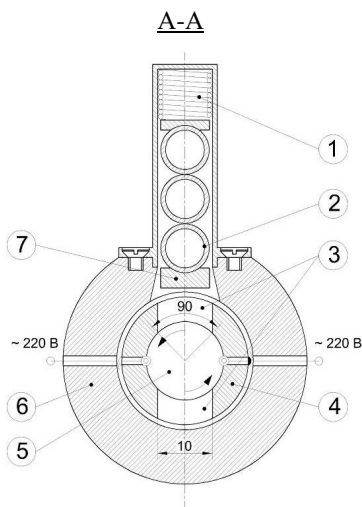


Рис. 2.6. Розріз по А-А - система подачі зарядів вибухової речовини до продувного каналу: 1 – пружина касети з зарядами вибухової речовини; 2 –

заряд вибухової речовини; 3 – отвори для подачі зарядів вибухової речовини в продувний канал; 4 – вал вертлюга; 5 – продувний канал; 6 – корпус вертлюга; 7 – затвор. Доцільно даний рисунок розглядати з рисунком 2.5

Вал вертлюга 4 обертається з кутовою швидкістю 22 рад/с, рис. 2.6. Для потрапляння зарядів ВР 2 в продувний канал передбачено два отвори 3 шириною по 10 мм, рис. 2.6. Внутрішня дуга отвору 3 формує кут 1,5 радіани від центру продувного каналу, рис. 2.6. Оскільки 22 радіани долаються за 1 секунду під час обертання, то 1,5 радіани – за 0,07 с. Тобто 0,07 с необхідно пружині 1 щоб проштовхнути заряд ВР в продувний канал. При цьому затвор повинен повернутись в початкове положення, як тільки заряд з касети опуститься на 10 мм. Оскільки заряд повинен пройти відстань 20 мм за 0,07 с, то прийнято, що 10 мм він пройде за 0,03 с. Відповідно затвору необхідно повернутись у початкове положення за 0,03 с, пройшовши відстань 14 мм, щоб перекрити шлях наступному заряду.

З рівняння кінематики рівноприскореного руху [85] визначаємо прискорення, яке необхідно створити пружиною затвору для його повернення початкове положення за 0,03 с.

$$a = \frac{2 \cdot l}{t^2} = \frac{2 \cdot 0.014}{0.03^2} = 31.10 \text{ м/с}^2, \quad (2.3)$$

де  $l = 0,014$  – відстань, яку проходить затвор, м;  $t = 0,03$  – час, за який затвор переходить у початкове положення, с.

Зусилля пружини затвору:

$$F = m_3 \cdot a = 0.01 \cdot 31.10 = 0.31 \text{ Н}, \quad (2.4)$$

де  $m_3 = 0,01$  - маса затвору, кг.

Згідно з отриманим значенням обрано пружину із зусиллям в стисненому стані 0,35 Н.

Оскільки тиск повітря в продувному каналі рівний 0,8 МПа, а площа отвору для подачі зарядів 0,0002 м<sup>2</sup>, тоді сила пружини:

$$F = P \cdot S = 800000 \cdot 0.0002 = 160 \text{ Н}, \quad (2.5)$$

де  $P = 0,8$  – тиск стисненого повітря в продувному каналі, МПа;  $m_3 = 0,0002$  – площа отвору для подачі зарядів, за конструкцією, м<sup>2</sup>.

Для касети із зарядами ВР обрано пружину із зусиллям в стиснутому стані 160 Н.

Імпульсна подача напруги до вибою в корпусі вертлюга 3 та вала 4 забезпечується через канали 1 електродами L та N, рис. 2.7.

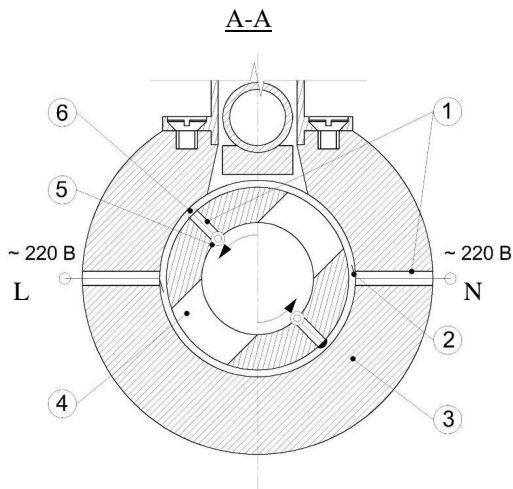


Рис. 2.7. Розріз по А-А - система імпульсної подачі напруги для ініціювання зарядів вибухової речовини на вибій: 1 – канали з електродами; 2 – пластина контактна; 3 - корпус вертлюга модифікованого; 4 – вал вертлюга; 5 –

електроди продувного каналу; 6 – напайка контактна. Даний рисунок розглядати з рисунком 2.5

Електроди N, L проходять крізь канали 1 в корпусі вертлюга та закінчуються контактними пластинами 2, рис. 2.7. Всередині валу вертлюга 4 прокладено електроди, що виходять крізь канали 1 і закінчуються контактними напайками контактними 6. Під час вибухо-механічного руйнування вал 4 обертається, викликаючи замикання напайок контактних 6 з пластинами контактними 2. Замикання відбувається 3 рази на секунду, оскільки вал 4 обертається з кутовою швидкістю 22 рад/с. В результаті напруга імпульсно передається від електродів N, L на електроди продувного каналу 5 з частотою 3,5 Гц, дивись розділ 5.

На рисунку 2.8 наведено двовимірне зображення конструктивного виконання механізму для вибухо-механічного руйнування ГП.

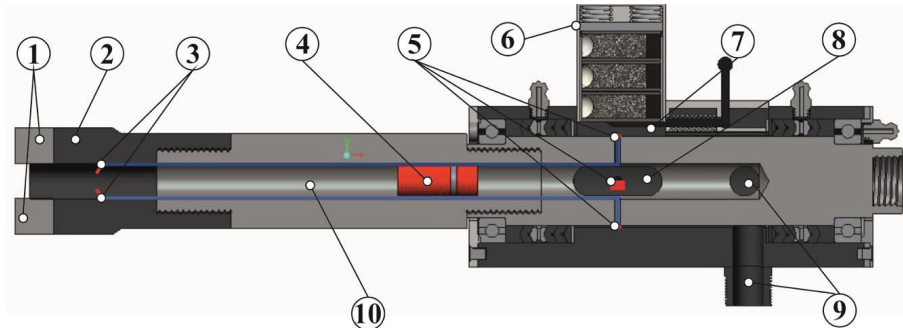


Рис. 2.8. Конструкція механізму для вибухо-механічного руйнування гірських порід: 1 – різці; 2 – ріжучий інструмент комбінованої дії; 3 – пластини контактні; 4 – заряд вибухової речовини; 5 – напайки контактні; 6 – касета з зарядами вибухової речовини; 7 – затвор; 8 – отвір для подачі зарядів вибухової речовини до продувного каналу; 9 – отвори для нагнітання стисненого повітря; 10 – продувний канал

В результаті взведення затвору 7 заряд ВР 4 надходить з касети 6 через отвір 8 до продувного каналу 10. Під дією тиску стисненого повітря, що нагнітається через отвори 9 заряд ВР 4 поступає до ріжучого інструменту 2, куди підведені контактні пластини 3. На контактні пластини 3 імпульсно подається напруга 220 В. Під час замикання контактних пластин 3 електродним кільцем заряду ВР 4 відбувається детонація. Формується КВЯ, що діє безпосередньо на вибій, формуючи внесену технологічну тріщинуватість, додатково до існуючої природної. Комплексна тріщинуватість знеміцнює вибій, що знижує питому енергоємність його руйнування різцями 1.

Пластини контактні 3 (рис. 2.8) виготовлено з легованої жаростійкої релакційностійкої сталі марки 35ХМ ГОСТ 2590-2006, ТУ 14-1-2252-2007, гр.2, товщиною 0,38 мм, що забезпечує їх пружність та цілісність під час вибуху зарядів ВР. За результатами експериментальної апробації (розділ 4) встановлено, що контактні пластини 3 не згорають під час вибуху. Це пояснюється мікросекундою тривалістю процесу [67], а отже і короткочасністю впливу температури. Також відомо [86], що під час зварювання вибухом металеві листи алюмінію товщиною 1 мм [86] не згорають при безпосередньому впливі продуктів детонації.

У випадку відмови детонації заряду передбачено застосування зарядів ВР з механічним (контактним) детонатором [67], рис. 2.9.

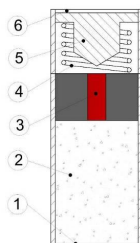


Рис. 2.9. Заряд вибухової речовини з механічним (контактним) детонатором: 1 – облицювання; 2 – конденсована вибухова речовина; 3 – капсуль-детонатор; 4 – пружина; 5 – ударник; 6 – мембрана



Заряди з механічним детонатором знаходяться в окремих касетах. Тобто при відмові звичайних зарядів, необхідне встановлення касети зарядів з механічним детонатором. Надійшовши до ріжучого інструменту, заряд ВР з механічним детонатором наштовхується на заряд ВР, що відмовив. Під час різкої зупинки заряду ВР під дією тиску стисненого повітря мембрана 6 руйнується, ударник 5 пробиває капсуль-детонатор 3. В результаті капсуль-детонатор ініціює конденсовану ВР 2. Формується вибухова хвиля, що передає детонацію до нездетонованого заряду ВР.

Створено конструкцію ріжучого інструменту вибухо - механічної дії, що має долотоподібну форму та передбачає зрізи технологічні 2, рис. 2.10.

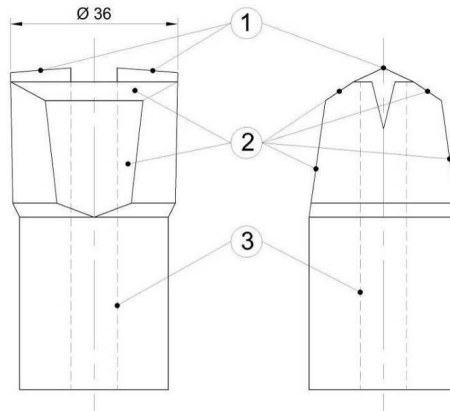


Рис. 2.10. Ріжучий інструмент вибухо-механічної дії: 1 – різці; 2 – зрізи технологічні; 3 – канал продувний

Зрізи 2 переходять до хвостової частини ріжучого інструменту, діаметр якої 32 мм, що на 4 мм менше від діаметра свердловини (36 мм). Тому площа для відведення продуктів детонації змінюється від 480 мм<sup>2</sup> до 213 мм<sup>2</sup>. За розрахунками, згідно з ГОСТ 16443-70, пропускна здатність такої площі рівна 0,0075 м<sup>3</sup>/с. Під час детонації 0,0005 кг сумішей на основі перхлорату калію виділяється близько 0,00016 м<sup>3</sup> газів [87]. Припустимо, що такий об'єм

виділяється за секунду. Тоді об'ємна витрата газу становить  $0,00016 \text{ м}^3/\text{с}$ , що в 21 раз менше пропускної здатності площі між ріжучим інструментом та стінами свердловини. Отже конструкція заряду задовольняє вимогам щодо безперешкодного відведення продуктів детонації на поверхню.

Відомо, що температура ріжучого інструменту під час руйнування ГП може зрости до  $800 \text{ К}$  [88]. Тому для охолодження різців ріжучого інструменту застосовано продувку стисненим повітрям. Виробничий досвід [59] підтверджує необхідне охолодження твердосплавних різців стисненим повітрям. Однак виникає ризик передчасної детонації ВР в продувному каналі. При цьому концентрована вибухова хвиля не змінить свого напрямку, та діятиме перпендикулярно до вибою. Розповсюдженню вибухової хвилі в сторони перешкоджають стінки ріжучого інструмента, що не руйнуються згідно з експериментальною апробацією, розділ 4.

Конструкція заряду передбачає забійку, що збільшує його активну масу, для підсилення вибухової хвилі у напрямку вибою. Додатково на заряд діє тиск стисненого повітря ( $0,8 \text{ МПа}$ ) в продувному каналі. Мікросекундний стрибок тиску в продувному каналі в результаті вибуху компенсується зворотнім клапаном компресора. Завдяки постійній імпульсній подачі напруги на контактні пластини (рис. 2.8) з частотою  $3,5 \text{ Гц}$  (розділ 5) детонація зарядів відбувається миттєво.

Поява комплексної тріщинуватості в ГП внаслідок впливу КВЯ оцінена методом ультразвукової дефектоскопії [89] на базі установки УИСУ-01, блок-схему показано на рис. 2.11. Дана установка передбачає неруйнівний акустичний контроль пружних властивостей ГП. Точність вимірювання складає не менше  $99,95 \%$  [90]. Тарирування установки відбувається еталонними зразками з плавленого кварцу, дивись розділ 4. Установка дозволяє проводити вимірювання зразків товщиною до  $100 \text{ мм}$ . Усі елементи установки складені зі стандартних вузлів сучасної електроніки, що полегшує роботу з під'єднання та налаштування. Результати вимірювань виводяться на осцилографічний екран програмного забезпечення «УЗ контроль», що забезпечує технологічність та

автоматизацію процесу. Приймально-випромінюючий тракт разом з блоком аналогово-цифрового перетворювача виконані на платі, що приєднана до внутрішнього роз'єму стандартного персонального комп'ютера. Управління роботою здійснюється за допомогою клавіатури або «мишки» через відповідне меню користувача.

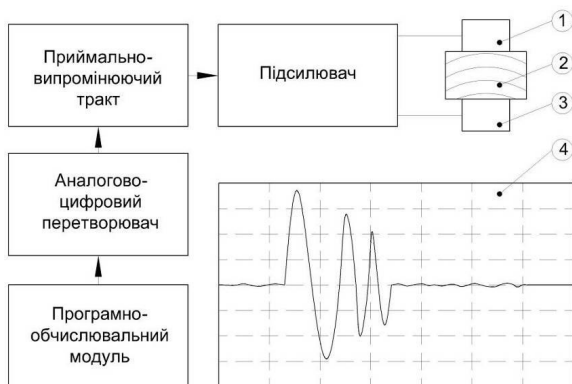


Рис. 2.11. Блок-схема ультразвукової установки: 1 – випромінювач ультразвукових хвиль; 2 – зразок гірської породи; 3 – приймач ультразвукових хвиль; 4 – осцилограма ультразвукового сигналу

Для візуального встановлення дефектів зразків внаслідок дії КВЯ застосовано метод капілярної дефектоскопії згідно з ГОСТ 23349-78 [91]. Поверхня досліджуваних зразків ГП повинні бути вишліфувана та очищена розчинником типу MR 88, ДСТУ EN 571-1. Заповнення тріщин відбувається пенетрантом MR 68 С ( ДСТУ EN 571-1 ) 2-класу чутливості, що проникає в тріщини шириною 1...10 мкм [91]. Для створення контрастного зображення тріщин на поверхні зразків обрано проявник типу MR 70, ДСТУ EN 571-1. В результаті поверхня зразків стає білою з чітко вираженими лініями тріщин та контурами кратерів, розділ 4. Даний метод дефектоскопії не потребує персоналу високої кваліфікації, є наглядним та точним. Важливим недоліком є фіксація тільки тих тріщин, що виходять на поверхню. Тому зразки граніту

досліджувались на поверхні та в площинах поперечного перетину, дивись розділ 4.

Визначення глибини проникнення комплексної тріщинуватості проведено методом рентгенографічного контролю зразків ГП [91]. Застосовано рентгенодефектоскопічний апарат РАП 150/300, що дозволяє просвічувати зразки товщиною до 250 мм. Цього достатньо оскільки найбільша сторона обраних зразків ГП не перевищує 80 мм, розділ 4.

Перевірка поверхні зразків на предмет формування внесених технологічних тріщин КВЯ проведена растровим електронним мікроскопом РЕМ-106И. Мікроскоп дозволяє в режимі реального часу отримувати високоякісні зображення поверхні зразків розміром 1280x960 пікселів, розділ 4. Діапазон збільшення 15...100000 разів дозволяє фіксувати тріщини шириною від 1 мкм. Максимальна похибка при визначенні лінійних розмірів 40 нм, що забезпечує точність масштабування та визначення розмірів тріщин.

Перевірка мікротопографії поверхні зразків ГП до та після навантажень КВЯ проведена безконтактним інтерференційним 3D профілографом «Мікрон-альфа». Прилад дозволяє в режимі реального часу будувати 2D та 3D профілі поверхонь зразків та кількісно оцінювати їх характеристики. За даними профілографа можливо оцінити геометричні розміри дефектів, що утворились на поверхні внаслідок впливу КВЯ, та їх форму.

Запропонований спосіб вибухо-механічного руйнування ГП (патент на винахід № 107732 UA, МПК E21B, 7/00) - альтернатива ударно-обертовому або обертовому. Ці способи руйнування застосовуються у тому числі на кар'єрах під час видобутку скельних ГП [14], запаси яких в надрах України складають 438,76 млн. м<sup>3</sup> [92]. Тому для експериментальної апробації обрано габро, граніт та пісковик, балансові запаси яких сягають понад 7 млн. м<sup>3</sup> [92]. Обрані зразки габро належать до північно-західної частини українського кристалічного щита. Зразки граніту – до приазовського району, а пісковик – з Донецького басейна, дивись розділ 4.

Повна потужність під час вибухо-механічного руйнування зразків ГП фіксувалась за допомогою професійного аналізатора електромережі АКТАКОМ АСМ 3192, рис. 2.12. Прилад працює як в мережі 220 В так і 380 В. Обладнано зручним дисплеєм, що відображає необхідні параметри вимірювання. Результати вимірювань потужності (діапазон від 0,00 кВт до 9,99 МВт) автоматично зберігаються на SD-карту в форматі Excel.

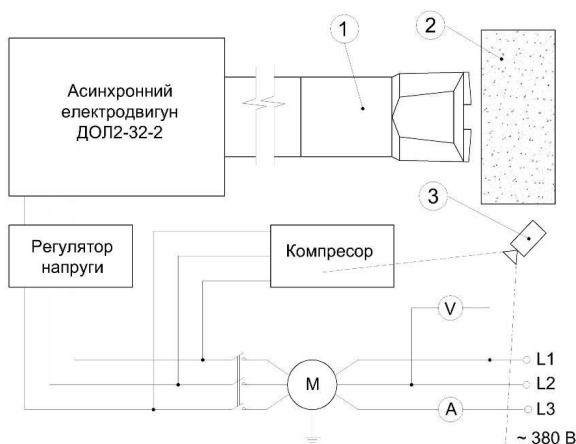


Рис. 2.12. Схема підключення експериментального пристрою до електромережі: 1 – ріжучий інструмент вибухо - механічної дії; 2 – зразок гірської породи; 3 – відеокамера

Подальше визначення питомої енергоємності розраховано діленням значень потужності на об'єм зруйнованої ГП. Геометричні параметри утворених шпурів в зразках ГП визначались за допомогою лазерного далекоміра типу Hilti PD-E (ISO 17123-4:2012). У приладі передбачена функція автоматичного розрахунку об'єму шпура за показниками його глибини та діаметра. Клас захисту IP55 та дисплей на електронних чорнилах дозволяє працювати з приладом на відкритій місцевості у виробничих умовах. Вбудована пам'ять на 30 вимірювань забезпечує зручність проведення досліджень.

Для забезпечення крутного моменту під час вибухо-механічного руйнування ГП обрано асинхронний електродвигун типу 4ААМ63А4У3. Здатен працювати як від побутової мережі (220 В) так і від промислової (380 В). Потужність двигуна (0,25 кВт) забезпечує максимальну кутову швидкість 145 рад/с. Щоб знизити кутову швидкість до необхідних значень 22 рад/с застосовано одноступінчастий черв'ячний редуктор типу 2Ч-40 з передаточним числом 6,3 в.о. Черв'ячний редуктор забезпечує плавність та безшумність роботи з крутним моментом 32 Н·м, що задовольняє вимоги досліджень.

Конструкцією двигуна передбачене його розташування в горизонтальній площині. Це дає змогу спростити каркас експериментального пристрою. Обрано трифазну систему електропостачання напругою 380 В. Вибір обумовлено економічністю трифазної системи: при однаковій потужності сила струму нижча ніж в однофазній системі. Важливим чинником є урівноваженість системи – відсутність нерівномірних механічних навантажень. Тобто забезпечується плавність роботи електродвигуна. Для нагнітання повітря до продувного каналу застосовано компресор потужністю 1,8 кВт, що працює від мережі напругою 220 В. Об'ємна витрата повітря змінюється в діапазоні 2,0...3,0 м<sup>3</sup>/хв, а швидкість потоку повітря – 8...16 м/с. Дані параметри відповідають рекомендаціям Всесоюзного інституту техніки розвідки (ВІТР) [93] щодо застосування повітря під час руйнування ГП.

Визначення потужності та часу роботи компресора забезпечив ватметр ЕУ ТS-836А. Працює від мережі 220 В, діапазон вимірювань складає 0...3,6 кВт. Має вбудований акумулятор для збереження даних.

Для контролю необхідної витрати стисненого повітря застосовано анемометр Testo 405-V1. Дозволяє розрахувати об'ємну витрату повітря діапазоном до 99990 м<sup>3</sup>/год. Довжина зонду 300 мм дозволяє проводити вимірювання дистанційно. Працює в діапазоні швидкості повітря 0,1...10 м/с при температурі 273...323 К, що відповідає умовам проведення апробації та рекомендаціям ВІТР [93].

Для горизонтального розміщення установки передбачено систему подачі зразків ГП до ріжучого інструменту, рис. 2.13.

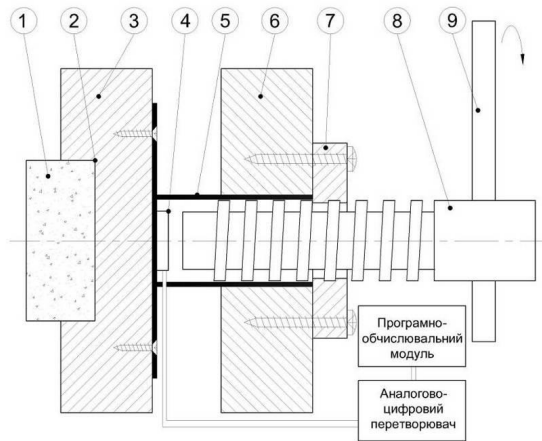


Рис. 2.13. Система подачі зразків гірських порід: 1 – зразок гірської породи; 2 – паз; 3 – платформа для подачі зразків гірських порід; 4 – датчик тензометричний мембранного типу BM24R; 5 – фланець; 6 – платформа фіксує; 7 – шайба; 8 – вал різьбовий; 9 – ручка валу різьбового

Застосовано датчик тензометричний 4 мембранного типу BM24R, рис. 2.13. Датчик дозволяє встановити необхідне зусилля подачі ріжучого інструменту комбінованої дії на зразок ГП 1. Діапазон вимірювань датчика складає 0,6...2,8 кН, що відповідає прийнятому зусиллю подачі 2,4 кН згідно з вимогами [93]. Для подачі зразків ГП до різця забезпечується ручне обертання валу різьбового 8. Під час обертання ручки 9, вал просувається повз шайбу 7 по різьбі. Коли кінець валу доходить до тензометричного датчика мембранного типу 4, платформа 3 разом з фланцем 5 та зразком ГП 1 просувається до ріжучого інструменту. Під час руйнування ГП можлива зміна зусилля подачі шляхом зміни навантаження на ручку валу 8. Тому для забезпечення незмінного зусилля подачі, його значення відслідковується на екрані ЕОМ. Для дотримання співвісної подачі зразків ГП використано фланець 5. Щоб зразки

ГП не змінювали свого положення під дією обертальних навантажень, в платформі 3 виконано паз 2 глибиною 15 мм. Так обмежується обертання у вертикальній площині зразків ГП, торці яких щільно прилягають до стінок пазу.

Обрані вимірювальні прилади та чутливі елементи, що винесені до таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

### Засоби вимірювання для проведення експерименту

№	Вимірювана величина	Назва приладу	Діапазон вимірювання	Похибка
1	2	3	4	5
Дефектоскопія зразків гірських порід до та після навантажень кумулятивним вибуховим ядром				
1	Швидкість ультразвукових хвиль	УИСУ-01 (ГОСТ 14782-86)	1,7...7 км/с	± 0,05 %
2	Модуль Юнга	Мікротвердомір «Мікрон-гамма» (ISO/FDIS 14577-1: 2002)	0...400 ГПа	± 0,5 %
3	Мікротопографія поверхні	3D профілограф «Мікрон-альфа» (ГОСТ 5.425-70)	0...40 мкм	-
4	Рентгенографічна дефектоскопія	Рентгенодефектоскопічний апарат РАП 150/300 (ГОСТ 7512-92)	250 мм	-
5	Капілярна дефектоскопія	Розчинник MR 88; пенетрант MR 68 C; проявник MR 70. (ДСТУ EN 571-1)	1...10 мкм	-
6	Мікроскопічна зйомка	Растровий електронний мікроскоп РЕМ-106Й (У2126-05)	15...100000 разів	40 нм
Параметри експериментальної установки				
1	Потужність (380 В)	Аналізатор електромережі Актаком АСМ 3192	0,00...9,99 МВт	± 1 %
2	Швидкість та витрата повітря	Анемометр Testo 405-V1	0...99 м <sup>3</sup> /год 0,1...10 м/с	± 0,1 м/с
3	Потужність (220 В)	Ватметр EU TS-836A	0,0...3,6 кВт	-
4	Зусилля подачі	Датчик тензометричний BM24R	0,6...2,8 кН	-

Параметри обраних вимірювальних приладів відповідають умовам проведення експериментальних досліджень вибухо-механічного руйнування ГП. Усі прилади, що використані під час досліджень сертифіковані згідно з вимогами ДСТУ та ISO.



## 2.3 Структура вибухо-механічного руйнування

У структурі системи проведення експерименту (рис. 2.14) виділено три підсистеми: підсистема послаблення вибою формуванням комплексної тріщинуватості; підсистема руйнування ГП; підсистема отримання-обробки даних.

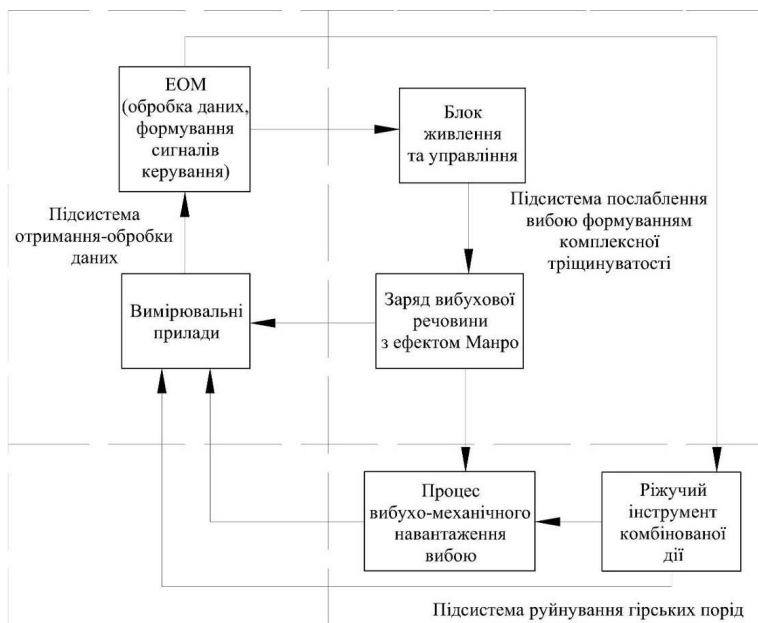


Рис. 2.14. Блок-схема проведення експерименту

До підсистеми вибухового формування технологічної тріщинуватості входить блок живлення та управління, що забезпечує налаштування параметрів установки та подачу зарядів ВР до вибою. Підсистема руйнування гірських порід передбачає вибухо-механічне навантаження вибою. Руйнування забезпечується сукупністю дії вузлів, що забезпечують подачу на вибій та обертання ріжучого інструмента комбінованої дії, циркуляцію стисненого повітря по продувному каналу.

Підсистема отримання-обробки даних виконує збір даних, отриманих в процесі експерименту, передачу їх на ЕОМ та подальшу обробку. Для цього використовуються вимірювальні пристрої (таблицю 2.3), які мають засоби синхронізації з комп'ютером, та власне комп'ютер. Оброблена інформація представляється у вигляді таблиць та графіків, що дозволяє знайти оптимальні значення чинників експерименту.

Матриця планування у явному вигляді з урахуванням послідовності виконання експериментів наведена в таблиці 2.4. За результатами проведення експериментів отримано залежність  $e=f(v)$  з трьома кривими для кожної ГП з відповідною межею міцності на стиснення, розділ 4.

Таблиця 2.4

**Матриця планування в явному вигляді для  $e=f(v)$**

Порядок проведення експерименту	№ експерименту	$x_0$	Планування									
			$x_1$	$x_2$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_e$	$S_g^2$	$y_p$	$(y_p - y_e)^2$
			$\sigma$ , МПа	$v$ , Гц								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	+1	130	0	238	207	225	239	227	223	211	256
3	2	+1	220	0	264	298	268	285	279	248	296	289
7	3	+1	130	0,4	174	197	212	185	192	266	191	1
9	4	+1	220	0,4	241	269	261	246	254	169	271	289
6	5	+1	130	0,2	249	279	250	272	263	234	279	256
4	6	+1	220	0,2	227	202	225	204	215	178	198	289
8	7	+1	180	0	222	260	223	255	240	413	250	100
2	8	+1	180	0,4	199	196	217	225	209	196	229	400
5	9	+1	180	0,2	231	233	202	223	222	201	236	196

Статистична обробка результатів вимірювань ОЦКП.

Число паралельних експериментів:  $m = 4$ , розділ 4.

Число різних експериментів:  $g = 9$ .

Всього експериментів:  $N = m \cdot g = 9 \cdot 4 = 36$ .

Зоряне плече:  $a=1$ .

Дисперсія (розсіяння) результатів повторних вимірювань в кожній точці [94]:

$$s_g^2 = \frac{\sum_{m=1}^m (y_m - y_e)^2}{m-1} =$$

$$= \frac{(238-227)^2 + (207-227)^2 + (225-227)^2 + (239-227)^2}{4-1} = 223 \quad (2.6)$$

де  $y_m$  – результати паралельних експериментів, таблиця 2.4;  $y_e$  – середнє значення результатів паралельних експериментів, таблиця 2.4.

Аналогічно розраховано дисперсії для решти восьми різних експериментів, результати яких внесені до стовпця 11 таблиці 2.4.

Перевірка однорідності дисперсій виконується за критерієм Кохрена [94]:

$$G_{\max} = \frac{s_{g \max}^2}{\sum_{u=1}^N s_g^2} = \frac{413}{2128} = 0,194 \quad (2.7)$$

де  $s_{g \max}^2 = 413$  - максимальне значення дисперсії, таблиця 2.4;  $\sum_{u=1}^N s_g^2 = 2128$  –

сума дисперсій, таблиця 2.4.

Табличний критерій Кохрена [94] для довірчої імовірності 95 %, кількості окремих експериментів 9 та кількості ступенів свободи  $m-1=3$  рівний 0,4027. Оскільки табличний критерій Кохрена (0,4027) більше розрахункового (0,194), дисперсії однорідні.

Коефіцієнти рівняння регресії:

$$b_0 = \frac{\sum_{k=1}^g y_e}{g} = \frac{2101}{9} = 233,44, \quad (2.8)$$

$$b_1 = \frac{\sum_{k=1}^g x_1 \cdot y_e}{\sum_{k=1}^g x_1^2} = \frac{66}{6} = 11, \quad (2.9)$$

$$b_2 = \frac{\sum_{k=1}^g x_2 \cdot y_e}{\sum_{k=1}^g x_2^2} = \frac{-29}{6} = -4,83, \quad (2.10)$$

$$b_{12} = \frac{\sum_{k=1}^g x_{12} \cdot y_e}{\sum_{k=1}^g x_{12}^2} = \frac{10}{4} = 2,5, \quad (2.11)$$

$$b_{11} = \frac{\sum_{k=1}^g x_1^2 \cdot y_e}{\sum_{k=1}^g x_1^2} = \frac{29,04}{2} = 14,52, \quad (2.12)$$

$$b_{22} = \frac{\sum_{k=1}^g x_2^2 \cdot y_e}{\sum_{k=1}^g x_2^2} = \frac{0,33}{2} = 0,165, \quad (2.13)$$

де  $x_1$  – рівні варіювання першого чинника в умовних змінних, стовпець 3, таблиця 2.1;  $x_2$  – рівні варіювання другого чинника в умовних змінних, стовпець 4, таблиця 2.1;  $x_{12}$  – рівні варіювання парної взаємодії першого та другого чинників в умовних змінних, стовпець 5, таблиця 2.1;  $x_1^2$  – рівні варіювання першого квадратичного члена в умовних змінних, стовпець 6, таблиця 2.1;  $x_2^2$  – рівні варіювання другого квадратичного члена в умовних змінних, стовпець 6, таблиця 2.1.

Рівняння регресії приймає вигляд:

$$\hat{Y} = 233,44 + 11 \cdot x_1 - 4,83 \cdot x_2 + 2,5 \cdot x_1 \cdot x_2 + 14,52 \cdot x_1^2 + 0,165 \cdot x_2^2 \quad (2.14)$$

Перевірка значимості коефіцієнтів регресії за критерієм Стюдента:

$$S^2_{\{b_0\}} = \frac{S^2}{N} = \frac{236,44}{36} = 6,56, \quad (2.15)$$

$$S^2 = \frac{\sum S_g^2}{g} = \frac{2128}{9} = 236,44, \quad (2.16)$$

$$t_0 = \frac{b_0}{\sqrt{S^2_{\{b_0\}}}} = \frac{233,44}{2,56} = 91,18, \quad (2.17)$$

де  $S^2_{\{b_0\}}$  – дисперсія коефіцієнтів для  $b_0$ ;  $S^2$  – загальна дисперсія;  $t_0$  – розрахункове значення критерія Стюдента для  $b_0$ .

Табличний критерій Стюдента [94] знаходимо для довірчої імовірності 95 % та числі ступенів свободи  $v=g(m-1)=27$ . Оскільки табличний критерій Стюдента (2,05) [94] менше розрахункового (91,18), коефіцієнт  $b_0$  – значимий.

$$S^2\{b_{1,2}\} = \frac{S^2}{(2^m + 2\alpha^2) \cdot m} = \frac{236,44}{(2^2 + 2 \cdot 1^2) \cdot 4} = 9,85, \quad (2.18)$$

$$t_1 = \frac{b_1}{\sqrt{S^2\{b_{1,2}\}}} = \frac{11}{3,13} = 3,51, \quad (2.19)$$

$$t_2 = \frac{b_2}{\sqrt{S^2\{b_{1,2}\}}} = \frac{4,83}{3,13} = 1,54, \quad (2.20)$$

де  $S^2\{b_{1,2}\}$  – дисперсія коефіцієнтів для  $b_1$  та  $b_2$ ;  $t_1$ ,  $t_2$  – розрахункові значення критерія Стюдента для  $b_1$  та  $b_2$ .

Оскільки табличний критерій Стюдента (2,05) [94] менше розрахункового (3,51), коефіцієнти  $b_1$  значимий, а  $b_2$  – не значимий відповідно.

Перевірка коефіцієнтів при парній взаємодії:

$$S^2\{b_{12}\} = \frac{S^2}{2^n \cdot m} = \frac{236,44}{2^2 \cdot 4} = 14,77, \quad (2.21)$$

$$t_{12} = \frac{b_{1,2}}{\sqrt{S^2\{b_{1,2}\}}} = \frac{2,5}{3,84} = 0,65, \quad (2.22)$$

де  $S^2\{b_{12}\}$  – дисперсія коефіцієнтів для  $b_{12}$ ;  $t_{12}$  – розрахункове значення критерія Стюдента для  $b_{12}$ .

Оскільки табличний критерій Стюдента (2,05) [94] більше розрахункового (1,61), коефіцієнти  $b_{1,2}$  – значимий.

Перевірка коефіцієнтів квадратичних членів

$$S^2\{b_{11,22}\} = \frac{S^2}{2\alpha^4 \cdot m} = \frac{236,44}{2 \cdot 4} = 29,55, \quad (2.23)$$

$$t_{11} = \frac{b_{12}}{\sqrt{S^2\{b_{12}\}}} = \frac{14,52}{5,43} = 2,67, \quad (2.24)$$

$$t_{22} = \frac{b_{22}}{\sqrt{S^2\{b_{22}\}}} = \frac{0,165}{5,43} = 0,03, \quad (2.25)$$

де  $S^2\{b_{11}\}$ ,  $S^2\{b_{22}\}$  – дисперсія коефіцієнтів для  $b_{11}$  та  $b_{22}$ ;  $t_{11}$   $t_{22}$  – розрахункові значення критерія Стюдента для  $b_{11}$  та  $b_{22}$ .

Оскільки табличний критерій Стюдента (2,05) [94] менше розрахункового (2,67), коефіцієнти  $b_{11}$  – значимий, а  $b_{22}$  – не значимий.

Рівняння регресії приймає остаточний вигляд:

$$\hat{Y} = 233,44 + 11 \cdot x_1 + 14,52 \cdot x_1^2 \quad (2.26)$$

Перевірка адекватності даного рівняння за критерієм Фішера:

$$F_{\text{роз}} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S^2} = \frac{346}{236,44} = 1,46, \quad (2.27)$$

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum (y_p - y_e)^2}{g - d} = \frac{2076}{9 - 3} = 346, \quad (2.28)$$

де  $d = 3$  – кількість членів рівняння регресії, що залишились після оцінки значущості, рівняння 2.2.

Табличне значення критерія Фішера [94] для довірчої імовірності 95 %,  $f_1 = g - d = 9 - 3 = 6$  (стовпець) та  $f_2 = g \cdot (m - 1) = 9 \cdot (4 - 1) = 27$  (рядок) рівне 2,46. Оскільки розрахункове значення критерія Фішера (1,46) менше табличного

(2,46), рівняння регресії визнається адекватним. Тобто розсіювання експериментальних даних змінної стану відносно рівняння регресії того ж порядку, що й розсіювання, викликане похибкою експерименту.

Аналогічно проведено статистичну обробку для залежності енергоємності вибухо-механічного руйнування ГП від температури вибуху  $e = f(T)$ . Матриця планування експериментів у явному вигляді з урахуванням послідовності їх виконання наведена в таблиці 2.4. За результатами проведення експериментів отримано залежність  $e = f(T)$  з трьома кривими для кожної ГП з відповідною межею міцності на стиснення, розділ 4.

Таблиця 2.5

**Матриця планування експерименту в явному вигляді для  $e = f(T)$**

Порядок проведення експериментів	№ експерименту	$x_0$	Планування									
			$x_1$	$x_2$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_e$	$S_g^2$	$y_p$	$(y_p - y_e)^2$
			$\sigma$ , МПа	$T$ , К								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	+1	130	0	238	207	225	239	227	223	211	256
3	2	+1	220	0	264	298	268	285	279	248	296	289
7	3	+1	130	3436	196	222	203	223	211	184	198	169
9	4	+1	220	3436	254	251	276	287	267	302	286	361
6	5	+1	130	2741	198	202	222	233	214	275	199	225
4	6	+1	220	2741	256	286	277	258	269	214	287	324
8	7	+1	180	0	222	260	223	255	240	413	250	100
2	8	+1	180	3436	207	241	243	214	226	339	238	144
5	9	+1	180	2741	242	210	221	244	229	273	239	100

Статистична обробка результатів експериментів ОЦКП для  $e = f(T)$ .

Число паралельних експериментів:  $m = 4$ , розділ 4.

Число різних експериментів:  $g = 9$ .

Всього експериментів:  $N = m \cdot g = 9 \cdot 4 = 36$ .

Зоряне плече:  $a=1$ .

Дисперсія (розсіювання) результатів повторних експериментів в кожній точці для  $e = f(T)$  розрахована за формулою 2.6. Результати внесено до стовпця 11 таблиці 2.5.



Перевірка однорідності дисперсій виконується за критерієм Кохрена [94]:

$$G_{\max} = \frac{S_{g \max}^2}{\sum_{g=1}^N S_g^2} = \frac{413}{2471} = 0,167. \quad (2.29)$$

Табличний критерій Кохрена [94] для довірчої імовірності 95 % кількості окремих експериментів 9 та кількості ступенів свободи  $m-1=3$  рівний 0,4027. Оскільки табличний критерій Кохрена (0,4027) більше розрахункового (0,194), дисперсії однорідні.

Коефіцієнти рівняння регресії:

$$b_0 = \frac{\sum_{k=1}^g y_e}{g} = \frac{2162}{9} = 240,22, \quad (2.30)$$

$$b_1 = \frac{\sum_{k=1}^g x_1 \cdot y_e}{\sum_{k=1}^g x_1^2} = \frac{163}{6} = 27,16, \quad (2.31)$$

$$b_2 = \frac{\sum_{k=1}^g x_2 \cdot y_e}{\sum_{k=1}^g x_2^2} = \frac{-42}{6} = -7, \quad (2.32)$$

$$b_{12} = \frac{\sum_{k=1}^g x_{12} \cdot y_e}{\sum_{k=1}^g x_{12}^2} = \frac{4}{4} = 1, \quad (2.33)$$

$$b_{11} = \frac{\sum_{k=1}^g x_1^2 \cdot y_e}{\sum_{k=1}^g x_1^2} = \frac{-63,37}{2} = -31,68, \quad (2.34)$$

$$b_{22} = \frac{\sum_{k=1}^g x_2^2 \cdot y_e}{\sum_{k=1}^g x_2^2} = \frac{8,57}{2} = 4,28, \quad (2.35)$$

Рівняння регресії приймає вигляд:

$$\hat{Y} = 240,22 + 27,16 \cdot x_1 - 7 \cdot x_2 + x_1 \cdot x_2 - 31,68 \cdot x_1^2 + 4,28 \cdot x_2^2 \quad (2.36)$$

Перевірка значимості коефіцієнтів регресії за критерієм Стюдента:

$$S^2\{b_0\} = \frac{S^2}{N} = \frac{274,55}{36} = 7,62, \quad (2.37)$$

$$S^2 = \frac{\sum S_g^2}{g} = \frac{2471}{9} = 274,55, \quad (2.38)$$

$$t_0 = \frac{b_0}{\sqrt{S^2\{b_0\}}} = \frac{240,22}{2,76} = 87,03. \quad (2.39)$$

Табличний критерій Стюдента [94] знаходимо для довірчої імовірності 95 % та числі ступенів свободи  $v=g(m-1)=27$ . Оскільки табличний критерій Стюдента (2,05) [94] менше розрахункового (87,03), коефіцієнт  $b_0$  – значимий.

$$S^2\{b_{1,2}\} = \frac{S^2}{(2^m + 2\alpha^2) \cdot m} = \frac{274,55}{(2^2 + 2 \cdot 1^2) \cdot 4} = 11,43, \quad (2.40)$$

$$t_1 = \frac{b_1}{\sqrt{S^2\{b_{1,2}\}}} = \frac{27,16}{3,38} = 8,03, \quad (2.41)$$

$$t_2 = \frac{b_2}{\sqrt{S^2\{b_{1,2}\}}} = \frac{7}{3,38} = 2,07. \quad (2.42)$$

Оскільки табличний критерій Стюдента (2,05) [94] менше розрахункових (8,03 та 2,07), коефіцієнти  $b_1$  та  $b_2$  – значимі.

Перевірка коефіцієнтів при парній взаємодії:

$$S^2\{b_{1,2}\} = \frac{S^2}{2^n \cdot m} = \frac{274,55}{2^2 \cdot 4} = 17,15, \quad (2.43)$$

$$t_{1,2} = \frac{b_{1,2}}{\sqrt{S^2\{b_{1,2}\}}} = \frac{1}{4,14} = 0,24. \quad (2.44)$$

Оскільки табличний критерій Стюдента (2,05) [94] більше розрахункового (0,24), коефіцієнт  $b_{1,2}$  – не значимий.

Перевірка коефіцієнтів квадратичних членів

$$S^2\{b_{1,22}\} = \frac{S^2}{2\alpha^4 \cdot m} = \frac{274,55}{2 \cdot 4} = 34,31, \quad (2.45)$$

$$t_{11} = \frac{b_{11}}{\sqrt{S^2\{b_{1,2}\}}} = \frac{31,68}{5,85} = 5,41, \quad (2.46)$$

$$t_{22} = \frac{b_{22}}{\sqrt{S^2\{b_{22}\}}} = \frac{4,28}{5,85} = 0,73. \quad (2.47)$$

Оскільки табличний критерій Стюдента (2,05) [94] менше розрахункового (5,41), і більше розрахункового  $t_{22}$ , коефіцієнти  $b_{11}$  – значимий, а  $b_{22}$  – не значимий.

Рівняння регресії приймає остаточний вигляд:

$$\hat{Y} = 240,22 + 27,16 \cdot x_1 - 7 \cdot x_2 - 31,68 \cdot x_1^2 \quad (2.48)$$

Перевірка адекватності даного рівняння за критерієм Фішера:

$$F_{\text{роз}} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S^2} = \frac{346}{274,55} = 1,26, \quad (2.49)$$

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum (y_p - y_e)^2}{g - d} = \frac{2076}{9 - 3} = 346, \quad (2.50)$$

де  $d = 4$  – кількість членів рівняння регресії, що залишились після оцінки значущості, рівняння 2.48.

Табличне значення критерія Фішера [94] для довірчої імовірності 95 %,  $f_1 = g - d = 9 - 4 = 5$  (стовпець) та  $f_2 = g \cdot (m - 1) = 9 \cdot (4 - 1) = 27$  (рядок) рівне 2,57. Оскільки розрахункове значення критерія Фішера (1,26) [94] менше табличного (2,46), рівняння регресії визнається адекватним. Тобто розсіяння експериментальних даних змінної стану відносно рівняння регресії того ж порядку, що й розсіяння, викликане похибкою експерименту.

## Висновки

1. В якості змінної стану процесу вибухо-механічного руйнування гірських порід, тобто цільовою функцією оптимізації, обрано питому енергоємність. Прийнято основні чинники, які впливають на енергоємність руйнування гірських порід: межа міцності на стиснення гірських порід, частота навантажень вибою кумулятивним вибуховим ядром, температура вибуху.

2. Розроблено оригінальний повнорозмірний експериментальний пристрій з модифікованим вертлюгом та ріжучим інструментом комбінованої дії. Конструкція ріжучого інструменту передбачає систему електричного ініціювання зарядів ВР. Змінена конструкція вертлюга дозволяє здійснювати одночасно і подачу зарядів ВР і нагнітати стиснене повітря у продувний канал.

3. Обґрунтовані методи фіксації основних чинників: механічний метод із застосуванням гідравлічного преса зусиллям 100...500 кН та з максимальною похибкою 2 % відповідно до ГОСТ 30629-99 для визначення межі міцності на стиснення зразків гірських порід; метод спектральної пірометрії для визначення температури вибуху зарядів вибухової речовини.

4. Для зниження енергоємності руйнування гірських порід вибухо-механічними навантаженням обрано поліноміальну регресійну математичну модель оптимізації.

5. Обрано критерій мінімуму кількості дослідів при дотриманні вимог до якості оцінки функції або чинників, ортогональний центральний композиційний план, що має мінімальну (достатню) кількість рівнів варіювання чинників – 3 рівні, ядром плану є повний чинниковий експеримент типу  $2^2 - 2$  чинники, 4 досліді.

6. Результати досліджень за розділом опубліковано в: [95] – розроблено конструкцію зарядів вибухової речовини; [96] – розроблено конструкцію експериментального пристрою та ріжучого інструменту вибухо - механічної дії; [97] – участь у створенні формули патенту на винахід «Спосіб комбінованого руйнування гірських порід».

### РОЗДІЛ 3

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕНЕРГОЄМНОСТІ ВИБУХО-МЕХАНІЧНОГО РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД

### 3.1 Критерії руйнування гірських порід

Для математичного моделювання вибухо-механічного руйнування ГП необхідно урахувати сукупність параметрів навантаження вибою КВЯ та внесеної технологічної дефектності, яка додається до існуючої природної тріщинуватості. Серед відомих критеріїв руйнування ГП виділено критерії Барбі Т., Гріфітса А.А., Екоборі Т., Журкова С.Н., Ірвіна Дж., Канеля Дж., Клепачко Я.Р., Курана Д., Орована Е., Ребіндера П.О., Ханима С., [98, 100, 104, 105, 107-110, 112-114]. Аналіз критеріїв проведено за урахуванням комбінованого впливу навантажень, швидкості їх прикладання та температурного чинника. Виділено переваги та недоліки перелічених критеріїв та можливість їх застосування під час моделювання вибухо-механічного руйнування ГП.

Барбі Т. та Куран Д. [98] на основі експериментальних результатів Журкова С.Н. [105] отримали рівняння функції визначення швидкості утворення тріщин:

$$N = N_0 \exp\left(\frac{\sigma - \sigma_n}{\sigma_r}\right), \quad (3.1)$$

де  $N_0$  – гранична швидкість утворення тріщин, м/с;  $\sigma$  – прикладене до зразка механічне напруження, Па;  $\sigma_n$  – граничне напруження утворення тріщин, Па;  $\sigma_r$  – відносне напруження, Па.

Згідно з [99] швидкість утворення (росту) тріщин відстає від швидкості навантаження в результаті наявності пластичних деформацій. Недоліком

критерію (3.1) є неврахування швидкості прикладання навантаження, що компенсує наявність пластичних деформацій. Крім цього відсутній вплив температурного чинника та комбінації навантажень на характер руйнування ГП.

Механіка руйнування за Гріфітсом А.А. [100] спрямована на пояснення утворення тріщин в крихких матеріалах. Робота в цьому напрямку мотивована двома суперечливими показниками:

- для руйнування скла необхідно прикласти тиск близько 100 МПа;
- теоретична міцність скла - 5 - 10 ГПа [101].

Таке відхилення межі міцності ідеального крихкого та реального тіла пояснюється наявністю мікрodefektів у останньому, що викликають концентрацію напружень. Тому Гріфітс А.А. запропонував енергетичне формулювання критерія руйнування на основі закону збереження енергії. Тріщина почне поширюватись, коли приріст поверхневої енергії компенсується відповідним виділенням потенційної енергії деформації (при відсутності інших видів енергії). Методика розрахунку приведена за [102]:

$$dU/dS = dW/dS, \quad (3.2)$$

де  $U$  – пружна енергія, Дж;  $W$  - енергія, необхідна для росту тріщини, Дж;  $S$  – площа нової поверхні, м.

Для  $dU/dl$  рівняння має вигляд:

$$dU/dS = \pi \sigma^2 l / E \text{ або } G = \pi \sigma^2 l / E, \quad (3.3)$$

де  $G$  – питома енергія, що вивільняється під час утворення мікротріщини, Дж/м<sup>2</sup>;  $E$  – модуль пружності І роду, Па.

Оскільки виникнення тріщини супроводжується утворенням поверхневої енергії на двох нових площинах, величина  $dW/dS$  має вигляд:

$$dW / dS = 2\gamma_0, \quad (3.4)$$

де  $\gamma_0$  – питома поверхнева енергія матеріалу під час крихкого руйнування, Дж/м<sup>2</sup>.

Прирівнявши праві частини рівнянь (3.3) та (3.4), виражено критичні значення, прикладених до ГП напружень:

- для плоского напруженого стану:

$$\sigma_c = \sqrt{2E\gamma_0 / (\pi l)}, \quad (3.5)$$

- у випадку плоскої деформації модуль пружності I роду замінено модулем плоскої деформації  $E^I = E / (1 - \nu^2)$ , для врахування повздовжніх та поперечних деформацій через коефіцієнт Пуассона  $\nu$ :

$$\sigma_c = \sqrt{2E^I \gamma_0 / \pi l} = \sqrt{2E\gamma_0 / [\pi l(1 - \nu^2)]}, \quad (3.6)$$

де  $E^I = E / (1 - \nu^2)$  – модуль плоскої деформації, Па;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона, в.о.

Гріфітс А.А. отримав одне з основних рівнянь механіки руйнування, за яким можливо вивести та розрахувати граничне навантаження для реальних ГП з мікротріщинами. Але критерій не враховує комбінованого впливу навантажень. Відомо [103], що на процес руйнування впливають швидкість прикладання навантаження та температура. У формулі (3.6) відсутні ці чинники.



Екоборі Т. у роботі [104] запропонував енергію активації, яка пояснювала логарифмічну залежність між критичним напруженням та початком процесу руйнування:

$$\Delta U(\sigma) = \Delta U_0 \ln \left( \frac{\sigma_0}{\sigma} \right), \quad (3.7)$$

де  $U_0$  – енергія активації руйнування ГП, Дж;  $\sigma_0$  – межа міцності ГП, Па.

У випадку рівності граничного та прикладеного навантажень енергія активації дорівнює нулю. Таким чином, формулою передбачено, що руйнування почнеться при  $\sigma > \sigma_0$ . Чим більше прикладене навантаження, тим швидше почнеться процес руйнування. Але руйнуванню сприяє не тільки механічне навантаження, а й фізичні чинники (температура, електромагнітні коливання), при наявності яких достатньою умовою можливе  $\sigma = \sigma_0$ .

Кінетична теорія міцності Журкова С.Н. [105] враховує наявність теплових коливань атомів, що розташовані у вузлах кристалічних решіток. Ріст тріщин представляється як процес послідовного розриву зв'язків в їх вершині. Утворення тріщин відбувається сукупністю механічних навантажень та теплових коливань атомів у вузлах кристалічних решіток. Отже критерій (3.8) передбачає комбінацію навантажень, що призводять до розриву зв'язків в структурі ГП. Критерій Журкова С.Н. має вигляд [105]:

$$t = t_0 \cdot \exp \left( \frac{U_0 - \gamma \sigma}{kT} \right), \quad (3.8)$$

де  $t$  – час до руйнування зразка, с;  $t_0$  – період теплових коливань атомів, стала, с;  $\gamma$  – коефіцієнт, пропорційний перенапруженню в міжатомних зв'язках в порівнянні з середнім напруженням в зразку, в.о.;  $k$  – стала Больцмана, Дж/К;  $T$  – температура, К.

Критерій (3.8) урахує залежність довговічності зразка під дією навантажень від тривалості навантаження та температури ГП, що руйнується. Таким чином критерій пояснює, що за наявності температурних коливань для руйнування достатньо некритичних навантажень. Прикладом слугує руйнування льоду. Міжмолекулярні зв'язки руйнуються з підвищенням температури. Тобто чим вище температура, тим нижче критичне навантаження. Проте руйнування ГП є більш складним процесом. Відомо [106], що підвищення температури супроводжується зниженням розповсюдження повздовжніх та поперечних хвиль (наприклад вибухових). Тому для вибухо-механічного руйнування ГП, модель С.Н. Журкова потребує доповнень.

Силовий критерій Ірвіна Дж. [107] пояснює напружено-деформований стан навколо тріщини крихкого тіла коефіцієнтом інтенсивності напружень. Тріщина почне розповсюджуватись в деформованому твердому тілі, якщо величина коефіцієнта інтенсивності напружень досягне деякого критичного для даної ГП значення. Цей критерій залишається справедливим за умови, якщо зона пластичних деформації обмежена. Оскільки гранично-рівноважний стан крихких та квазікрихких матеріалів визначається енергетичним [100] та силовим [110] критеріями руйнування, то між ними існує зв'язок, який визначив Ірвін Дж.:

- для плоского напруженого стану

$$K = \sqrt{EG} ; \quad (3.9)$$

- для плоскої деформації

$$K = \sqrt{(E^I G)} = \sqrt{(EG)/(1-\nu^2)} , \quad (3.10)$$

де  $K$  – коефіцієнт інтенсивності навантажень, Па $\sqrt{м}$ .

Підставивши значення  $G$  з (3.3) в (3.9), визначено критичне значення зовнішнього навантаження на тіло:

$$\sigma = \frac{K}{\sqrt{\pi l}}. \quad (3.11)$$

Ірвін Дж. поєднав силовий та енергетичний підхід для визначення гранично-рівноважного стану твердих матеріалів та передбачив пластичність деформацій навколо тріщин. Це дозволило перейти від ідеального крихкого тіла до реальних матеріалів. Проте актуальні на сьогодні питання впливу комбінованих навантажень, температурного та часового чинників на хід руйнування твердих тіл не розглянуті.

Канелом Дж. [108] встановлена емпірична залежність:

$$\varphi = \chi \left( \frac{\sigma}{\sigma_{\pi}} \right)^{\alpha}, \quad (3.12)$$

де  $\varphi$  – об’ємна швидкість деформації,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\alpha$  та  $\chi$  – емпіричні коефіцієнти, в.о.;  $\sigma_{\pi}$  – граничне міжатомне напруження, Па.

Вираз 3.12 передбачає вплив навантаження на швидкість деформації, проте не враховує швидкість навантаження. Крім температурного чинника відсутній вплив існуючих дефектів (природних тріщин) твердих тіл. Залежність є емпіричною та не має теоретичного підґрунтя.

Критерій Журкова С.Н. (3,8) розвинув Клепачко Я.Р. [109] для короткого та надкороткого часу навантаження. Для отримання цього критерія використано енергію активації (3,7), запропоновану Екоборі Т. [104].

Клепачко Я.Р. отримав наступний критерій:

$$t = \int_0^t \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{\frac{\Delta U_0}{kT}} dt, \quad (3.13)$$

Критерій пов'язує граничне навантаження з прикладеним, та час до руйнування, який в свою чергу залежить від температурного чинника. Комбінований вплив навантажень визначається поєднанням джерела фізичних (температура) та механічних напружень.

Орован Е. [110] розширив критерій Гріфітса А.А., врахувавши квазікрихке руйнування. Це дозволило задіяти питому роботу пластичної деформації, яка зосереджена в тонкому шарі навколо тріщини:

$$\sigma_c = \sqrt{2E(\gamma_0 + \gamma_{II})/(\pi l)}, \quad (3.14)$$

де  $\gamma_{II}$  – питома енергія пластичної деформації на одиницю поверхні тріщини при квазікрихкому руйнуванні, Дж/м<sup>2</sup>.

Оскільки зона пластичних деформацій обмежена, очевидно, що критерієм передбачено навантаження з певною швидкістю. Це пояснюється тим, що при швидкому (імпульсному) навантаженні пластичні деформації не встигають повністю реалізуватися (їх зона обмежена) [111]. Проте, відсутня можливість комбінованого навантаження та вплив температурного чинника на процес руйнування.

Критерій Ребіндера П.О. [58] описаний з урахуванням пластичної деформації. Енергія, що витрачається на руйнування ГП має вигляд суми енергій, спрямованих на об'ємну деформацію ГП  $A_0$  (потенційна енергія) та утворенню нової поверхні  $A_n$ :

$$A = A_0 + A_n. \quad (3.15)$$

Доданки рівняння Ребіндер П.О. розкрив критеріями Кіріпчева-Кіка [112] та Рітінгера П.Р. [113]. Отже загальний закон руйнування:

$$A = \sigma^2 V / 2E + k(S_0 - S_1), \quad (3.16)$$

де  $V$  – об’єм гірської породи,  $\text{м}^3$ ;  $k$  – питома енергія сили, що діє на гірську породу,  $\text{Дж}/\text{м}^2$ ;  $S_0, S_1$  – початкова та поточна площа поверхні гірської породи,  $\text{м}^2$ .

Критерій Ребіндера П.О. врахує сукупність дії навантажень оскільки поєднує в собі закони Кіріпчева-Кіка [112] та Рітінгера П.Р. [113]. За Кіріпчевим-Кіком [112] робота, що витрачається на руйнування пропорційна об’єму ГП, що руйнується. Отже формула визначає пружну деформацію ГП. Закон Рітінгера П.Р. [113] справедливий для процесів помолу (переподрібнення), де переважно відбувається утворення нових поверхонь. Крім відсутності температурного та часового чинників, прикладене до зразка навантаження наявне лише в одному з доданків, що некоректно у випадку комбінованого впливу навантажень.

Ханим С. разом з Клепачко Я.Р. [114] розширили вплив температурного чинника в критерії (3.13), виразивши граничне навантаження  $\sigma_0$  як функцію температури:

$$\sigma(T) = \sigma_0 \frac{G(T)}{G}, \quad (3.17)$$

де  $\sigma_0$  – межа міцності при температурі близько 0 К, Па;  $G(T)$  – модуль зсуву при температурі 0 К, Па.

Так критерій Журкова С.Н. модифіковано з урахуванням експериментальних значень граничних напружень при різних температурах.

Поведінка ГП під навантаженням при різних температурах пояснює комбінований вплив фізико-механічних навантажень.

Розглянувши основні критерії руйнування проведено їх порівняльний аналіз відносно трьох показників: швидкість навантаження, температурний чинник, комбінований вплив навантажень. Це дозволило виділити критерії, що відповідають вимогам руйнування ГП запропонованим вибухо-механічним способом. Результати аналізу із поясненням наявності того чи іншого показника винесені до таблиці 3.1. Завдяки формі викладення аналітичного матеріалу, зручно знаходити необхідні чинники, та доповнювати ними критерії, що удосконалюються.

Таблиця 3.1

### Порівняльна характеристика критеріїв руйнування

Критерії руйнування	Швидкість прикладання навантажень	Вплив температурного чинника	Комбінований вплив навантажень
1	2	3	4
Барбі Т. та Куран Д. $N = N_0 \exp\left(\frac{\sigma - \sigma_n}{\sigma_r}\right)$	залежність швидкості утворення тріщин від навантаження	-	-
Гріфітс А.А. $\sigma_c = \sqrt{2E\gamma_0 / (\pi l)}$	-	-	-
Екоборі Т. $\Delta U(\sigma) = \Delta U_0 \ln\left(\frac{\sigma_0}{\sigma}\right)$	-	-	-
Журков С.Н. $t = t_0 \cdot \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}\right)$	час до руйнування	температурні коливання атомів	температура + механічне навантаження
Ірвін Дж. $\sigma = K / \sqrt{\pi l}$	-	-	-
Канел Дж. $\phi = \chi\left(\frac{\sigma}{\sigma_c}\right)$	об'ємна швидкість деформації	-	-

Закінчення таблиці 3.1

1	2	3	4
Клепачко Я.Р. $t_{-0} = \int \left( \frac{\sigma}{\sigma_c} \right)^{\frac{0.01}{n-1}} dt$	час до руйнування	температурні коливання атомів	температура + механічне навантаження
Орован Е. $\sigma_c = \sqrt{2E(\gamma_0 + \gamma_{II})/(\pi l)}$	обмежена зона пластичності	-	-
Ребіндер П.О. $A = \sigma^2 V / 2E + k(S_0 - S_1)$	-	-	подрібнення та помол
Ханим С. та Клепачко Я. Р. $\sigma_c(T) = \sigma_c \frac{G(T)}{G(T_0)}$	-	граничне навантаження при заданій температурі	температура + навантаження

Відомі критерії руйнування, особливо силові та енергетичні описують розвиток мікротріщин при одноосному розтягу. Тобто враховують лише дію одного навантаження. Критерій Гріфітса А.А. [100] описує руйнування для крихких тіл. Цей недолік врахував Орован Е., додавши зону пластичних деформацій [110]. Але сьогодні відомо, що величина зони пластичної деформації залежить від швидкості навантаження.

Критерій Ребіндера П.О. [58] описує комплексне руйнування ГП на макрорівні. Тому не врахована реакція кристалів та їх зв'язків у складі мінералів під час руйнування. Другий доданок критерія (3.16), який описує процес помолу не залежить від навантаження. Не передбачено пластичного руйнування, впливу температури та швидкості прикладання навантажень. Ці прогалини разом з відсутністю комбінованого впливу навантажень обмежують використання критерія Ребіндера П.О.

Екоборі Т. [104] розглядав енергію активації, що показує логарифмічну залежність граничного навантаження від номінального. Але граничне та номінальне навантаження можуть співпадати, і енергія, необхідна для руйнування буде рівною нулю. Тому критерій (3.7) не відповідає вимогам комбінованого руйнування ГП. Граничне навантаження не може бути

константою і змінюється в залежності від температурних умов руйнування, та фізико-механічних властивостей ГП. Відсутня залежність від швидкості прикладання навантаження, що впливає на характер руйнування і проявляється в пластичності та пружності деформацій.

Журков С.Н. удосконалив [105] критерій Екоборі Т., врахувавши температурні коливання міжатомних зв'язків. Критерій Журкова С.Н. передбачає довговічність зразка під навантаженням, що пропорційна коливанням міжатомних зв'язків. Механічне навантаження представлене в якості послаблюючого, а руйнівним чинником є температура. Хоча це відображає комбіновану дію навантажень, такий підхід не задовольняє потреб вибухо-механічного руйнування ГП. Оскільки відсутня швидкість прикладання навантаження, що впливає на характер руйнування, формулу можна вважати неповною.

Ханим С. та Клепачко Я.Р. сформулювали критерій [114], який відображає залежність граничного навантаження від модуля зсуву. Модуль зсуву передбачає дію лише дотичних навантажень, а отже не описує об'ємну деформацію. Даний критерій доцільно застосувати як доповнення до відомих базових критеріїв.

За основу свого критерія Барбі Т. та Куран Д. [98] взяли критерій Журкова С.Н. [105]. Довговічність зразка, або час до руйнування замінили швидкістю утворення тріщин. Цей показник не може бути константою та залежить від умов руйнування. Відповідно і граничне навантаження утворення тріщин залежить від швидкості навантаження та температурного чинника. Формулою таких залежностей не передбачено.

Головним недоліком перелічених критеріїв руйнування є врахування лише одного механічного навантаження. Отже актуальною та досі невирішеною науково-технічною задачею є зниження питомої енергоємності руйнування ГП за рахунок комбінованого впливу вибухо-механічних навантажень.



### 3.2 Модель вибухо-механічного руйнування

Для уточнення процесу вибухо-механічного руйнування ГП створено критерій (3.18), який доповнено наступними показниками:

- енергію активації руйнування ГП  $U_0$  (3.19), що враховує: енергію кристалічних решіток, кількість та молярну масу мінералів у складі ГП, коефіцієнти існуючої природної, внесеної технологічної тріщинуватостей та анізотропії ГП; об'єм ГП, що руйнується та її щільність;

- кінетичну енергію КВЯ  $U_{уд}$ , для послаблення ГП внесенням технологічної тріщинуватості;

- потенційну теплову енергію вибуху  $U_t$ , що враховує температуру вибуху, та визначає тиск та швидкість КВЯ;

- енергію, що витрачається на механічне руйнування ГП  $U_{мех}$ .

Отже базовий критерій:

$$e = \frac{k \cdot N \cdot t}{V} \cdot \exp \left( \frac{U_0 - U_K - U_T}{U_{мех}} \right), \quad (3.18)$$

де  $k$  – емпіричний коефіцієнт в межах математичного моделювання, в.о.;  $e$  – питома енергоємність комбінованого руйнування ГП, Вт·год/м<sup>3</sup>;  $N$  – потужність електроприводу експериментального пристрою, Вт;  $V$  – об'єм ГП, що руйнується для експерименту, м<sup>3</sup>;  $t$  – час руйнування об'єму ГП під час експерименту, год;  $U_K$  – кінетична енергія КВЯ на ГП, Дж;  $U_t$  – теплова енергія вибуху, Дж;  $U_{мех}$  – енергія механічного руйнування, Дж.

Для урахування параметрів вибухо-механічного навантаження вибою та сукупність дії його природної та внесеної тріщинуватостей базовий критерій доповнено:

- енергією активації руйнування ГП, створена на основі питомої масової енергії кристалічних решіток [115]:

$$U_0 = \frac{\sum_{i=1}^n (n_i \cdot U_i) \cdot \rho \cdot V \cdot \eta_0}{\sum_{i=1}^n (n_i \cdot M_i)}, \quad (3.19)$$

де  $n_i$  – частка мінералів у складі ГП, в.о.;  $U_i$  – енергія кристалічних решіток мінералів, Дж/моль;  $\rho$  – щільність ГП, кг/м<sup>3</sup>;  $\eta_0$  – коефіцієнт природної тріщинуватості, в.о.;  $M_i$  – молярна маса мінералів ГП, кг/моль;

- кінетичною енергією КВЯ на ГП, що рівна модифікованій швидкості проникнення кумулятивного струменю в перешкоду згідно з [67]:

$$U_K = \frac{m_0 \cdot a \cdot p_K \cdot u_0^2}{\sigma_{CT} \cdot [1 + (\alpha_1 \cdot \rho) / (\alpha_2 \cdot \rho_1)]^2}, \quad (3.20)$$

де  $m_0$  – маса облицювання заряду, кг;  $a$  – коефіцієнт використання вибуху, еквівалентний частоті навантажень КВЯ, в.о.;  $p_K$  – тиск КВЯ, Па;  $u_0$  – швидкість КВЯ, км/с;  $\sigma_{CT}$  – межа міцності на стиснення ГП, Па;  $\alpha_1$  – стисливість КВЯ, Па<sup>-1</sup>;  $\alpha_2$  – стисливість ГП, Па<sup>-1</sup>;  $\rho_1$  – щільність КВЯ, кг/м<sup>3</sup>;

- потенційною тепловою енергією вибуху, створеної на основі теорії академіка Зельдовича Я.Б. [116]:

$$U_t = a \cdot \sum_{k=1}^n i_k \cdot k \cdot T_{\text{виб}} \cdot N_A \cdot \frac{m_{\text{ВР}}}{M_{\text{ВР}}}, \quad (3.21)$$

де  $T_{\text{виб}}$  – температура вибуху, К;  $i_k$  – ступені свободи продуктів детонації, в. о.;  $N_A$  – число Авогадро, моль<sup>-1</sup>;  $m_{\text{ВР}}$  – маса заряду ВР, обрано відповідно до конструкції ріжучого інструменту, кг;  $M_{\text{ВР}}$  – молярна маса ВР, кг/моль;

- енергією механічного руйнування ГП:

$$U_{\text{мех}} = \pi \cdot \beta \cdot p \cdot \omega \cdot D \cdot t, \quad (3.22)$$

де  $\beta$  - коефіцієнт тертя різців об ГП, в.о.;  $p$  - зусилля подачі ріжучого інструмента на вибій, Н;  $\omega$  - кутова швидкість ріжучого інструмента, рад/с;  $D$  - діаметр ріжучого інструменту, м;  $t$  - час руйнування ГП, с.

Доповнивши базовий критерій (3.18), критеріями (3.19), (3.20), (3.21), (3.22) отримано математичну модель вибухо-механічного руйнування ГП:

$$e = \frac{k \cdot N \cdot t}{V} \cdot \exp \left( \frac{\sum_{i=1}^n (n_i \cdot U_i) \cdot p \cdot V \cdot \eta_0}{\sum_{i=1}^n (n_i \cdot M_i)} - \frac{m_{\text{яд}} \cdot a \cdot p_{\text{уд}} \cdot u_0^2}{\sigma_{\text{ст}} \cdot [1 + (\alpha_1 \cdot p) / (\alpha_2 \cdot p_1)]^2} - a \cdot \sum_{k=1}^n i_k \cdot k \cdot T \cdot N_A \cdot \frac{m_{\text{BP}}}{M_{\text{BP}}} \right) \cdot (\pi \cdot \beta \cdot p \cdot \omega \cdot D \cdot t)^{-1}. \quad (3.23)$$

Математична модель зниження енергоємності руйнування ГП відрізняється тим, що враховує параметри вибухо-механічного навантаження вибою і сукупність дії його природної та внесеної технологічної тріщинуватостей. Математичне моделювання проведено для габро, граніту та пісковика. Аналітично встановлено, що внаслідок впливу КВЯ на вибій, енергоємність руйнування габро знижується з 297 кВт·год/м<sup>3</sup> до 273 кВт·год/м<sup>3</sup>, граніту - з 250 кВт·год/м<sup>3</sup> до 228 кВт·год/м<sup>3</sup>, пісковика - з 210 кВт·год/м<sup>3</sup> до 191 кВт·год/м<sup>3</sup>.

### 3.3 Адекватність моделі вибухо-механічного руйнування

Математичне моделювання проведено для габро, граніту, пісковика, розділ 2. Для перевірки математичної моделі комбінованого руйнування ГП використано програмне забезпечення MathCAD. Перевагами є зручна математична форма запису, легкість освоєння та використання, оформлення розрахунків у вигляді графіків. Кількість вбудованих функцій відповідає вимогам розрахунків до даного розділу.

Під час математичного моделювання визначено залежності енергоємності руйнування ГП від: частоти навантажень вибою КВЯ  $e=f(v)$ ; швидкості КВЯ  $e=f(u)$ ; температури вибуху  $e=f(T)$ ; тиску КВЯ  $e=f(P)$ , рис. 3.1-3.2. Аналітичні залежності отримані за формулою 3.23.

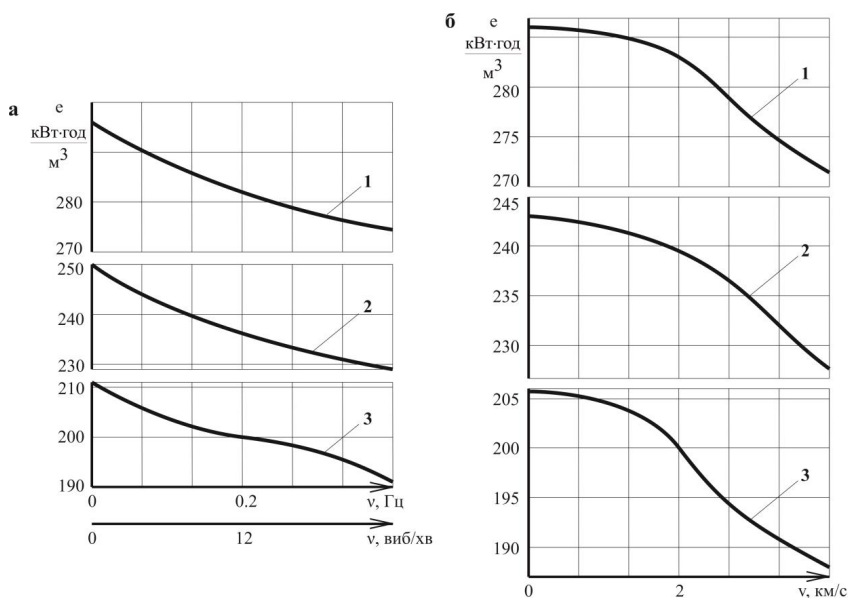


Рис. 3.1. Залежності енергоємності руйнування ГП від: а – частоти навантажень вибою кумулятивним вибуховим ядром; б – від швидкості кумулятивного вибухового ядра (1 – габро; 2 – граніт; 3 - пісковик)

З рис. 3.1 а видно, що енергоємність руйнування ГП спадає по експоненті зі зростанням частоти навантажень вибою КВЯ. Залежність для габро та граніту поділяються на дві ділянки: перша – від 0 до 0,2 Гц; друга – від 0,2 до 0,4 Гц. Перша ділянка для габро та граніту характеризується зниженням енергоємності руйнування з тангенсом кута падіння  $\text{tg}(34^\circ)=0,67$  та  $\text{tg}(27^\circ)=0,50$  відповідно. Це пояснюється переважанням пружних властивостей ГП, що забезпечує ефективне руйнування її поверхневих шарів. Мінерали, що входять до складу ГП, відколюються внаслідок близькості до епіцентру вибуху. На поверхні формуються впадини та ущелини, що полегшують механічне руйнування вибою. Енергоємність руйнування на першій ділянці знизилась з 297 кВт·год/м<sup>3</sup> до 283 кВт·год/м<sup>3</sup> для габро та з 250 кВт·год/м<sup>3</sup> до 236 кВт·год/м<sup>3</sup> для граніту.

На другій ділянці від 0,2 до 0,4 Гц відбувається згладжування залежності з тангенсом кута  $\text{tg}(16^\circ)=0,28$  для габро та  $\text{tg}(15^\circ)=0,26$  для граніту. ГП ущільнюються під дією вибухових навантажень, що призводить до зростання їх теплопровідності та як наслідок появи пластичних деформацій. Енергоємність руйнування на другій ділянці знизилась з 283 кВт·год/м<sup>3</sup> до 273 кВт·год/м<sup>3</sup> для габро та з 236 кВт·год/м<sup>3</sup> до 228 кВт·год/м<sup>3</sup> для граніту.

Залежність енергоємності руйнування від частоти навантажень вибою КВЯ для пісковика має 3 ділянки: перша – від 0 до 0,12 Гц; друга – від 0,12 до 0,2 Гц; третя – від 0,2 до 0,4 Гц. Перша ділянка характеризується зниженням енергоємності з 211 кВт·год/м<sup>3</sup> до 203 кВт·год/м<sup>3</sup> з тангенсом кута падіння  $\text{tg}(39^\circ)=0,80$ . Як для габро та граніту зниження енергоємності руйнування пісковика на першій ділянці пояснюється крихким руйнуванням поверхні з відколюванням мінералів. Пластичні властивості пісковика не встигають реалізуватись внаслідок швидкості вибухового навантаження близько 4 км/с [67]. На другій ділянці крива стає пологою з тангенсом кута падіння  $\text{tg}(13^\circ)=0,23$  зі зниженням енергоємності руйнування від 203 кВт·год/м<sup>3</sup> до 200 кВт·год/м<sup>3</sup>. Це пояснюється ущільненням пісковика за рахунок його пористості та пластичного цементуючого середовища. На третій ділянці починається падіння кривої з тангенсом кута  $\text{tg}(16^\circ)=0,28$  з 200 кВт·год/м<sup>3</sup> до

191 кВт·год/м<sup>3</sup>. Внаслідок ущільнення та під дією подальших вибухових навантажень пісковик досягає межі міцності на стиснення 130 МПа, розділ 4. В результаті розвивається система комплексної тріщинуватості.

Залежність енергоємності руйнування ГП від швидкості КВЯ має поліноміальний характер, рис. 3.1 б. Перша характерна ділянка – пологий відрізок в діапазоні від 0 до 2 км/с з тангенсом кута падіння  $\text{tg}(12^\circ)=0,21$ . Зниження енергоємності на першій ділянці відбулось: з 286 кВт·год/м<sup>3</sup> до 283 кВт·год/м<sup>3</sup> для габро; з 243 кВт·год/м<sup>3</sup> до 239 кВт·год/м<sup>3</sup> для граніту; з 206 кВт·год/м<sup>3</sup> до 203 кВт·год/м<sup>3</sup> для пісковика. Ця ділянка відзначається збільшенням опору ГП деформаціям зі зростанням швидкості навантаження, що пов'язано з початковим ущільненням ГП. На другій ділянці від 2 км/с до 3 км/с зростає інтенсивність зниження енергоємності руйнування ГП з тангенсом кута падіння  $\text{tg}(34^\circ)=0,67$ . Енергоємність на другій ділянці знизилась на: 5 кВт·год/м<sup>3</sup> від 283 кВт·год/м<sup>3</sup> для габро; 6 кВт·год/м<sup>3</sup> від 239 кВт·год/м<sup>3</sup> для граніту; 8 кВт·год/м<sup>3</sup> від 203 кВт·год/м<sup>3</sup> для пісковика. Відомо [67], що вибухова хвиля характеризується тим, що пік навантаження чергується його спадом, при якому ГП знеміцнюються, тобто зменшується опір деформаціям і починається процес руйнування. В результаті ядро ущільнення, що утворилось на першій ділянці переходить область внесеної технологічної тріщинуватості, розділ 4. Третя ділянка від 3 км/с до 4 км/с – відрізок з тангенсом кута падіння  $\text{tg}(35^\circ)=0,70$ . Зниження енергоємності на третій ділянці відбулось: з 278 кВт·год/м<sup>3</sup> до 271 кВт·год/м<sup>3</sup> для габро; з 233 кВт·год/м<sup>3</sup> до 227 кВт·год/м<sup>3</sup> для граніту; з 195 кВт·год/м<sup>3</sup> до 187 кВт·год/м<sup>3</sup> для пісковика. Вже сформована внесена технологічна тріщинуватість і зростання швидкості КВЯ призводить до подрібнення ГП верхнього шару. При цьому зменшення розміру фракцій викликає зростання енергоємності, що підтверджено дослідженням інших авторів [48].

Спадаюча поліноміальна залежність енергоємності руйнування від температури вибуху (рис. 3.2 в) відображає зниження пружних властивостей ГП зі збільшенням температури.

Криві залежностей поділяються на 2 ділянки: перша – від 0 К до 3000 К; друга – від 3000 К до 4000 К. На першій ділянці відбувається майже прямолінійне зниження енергоємності руйнування ГП з середнім значенням тангенсом кута падіння  $\text{tg}(13^\circ)=0,23$ . Зростання температури вибуху сприяє зростанню швидкості КВЯ та його тиску. Температура самого ж КВЯ не перевищує 1000 К [67]. Тому температура вибуху в запропонованому способі не є руйнівним чинником. Енергоємність руйнування на першій ділянці знизилась на 20 кВт·год/м<sup>3</sup> для габро, на 17 кВт·год/м<sup>3</sup> для граніту, на 17 кВт·год/м<sup>3</sup> для пісковика, рис. 3.2 в.

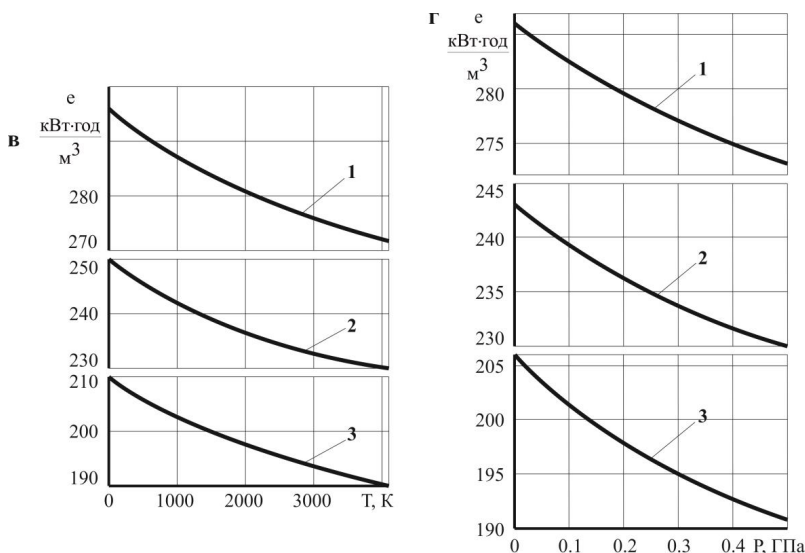


Рис. 3.2. Залежності енергоємності руйнування гірських порід від: в – температури вибуху; г – тиску кумулятивного вибухового ядра (1 - габро; 2 – граніт; 3 - пісковик)

На другій ділянці від 3000 К до 4000 К зниження енергоємності руйнування відбувається з тангенсом кута  $\text{tg}(8^\circ)=0,14$ , що вказує на зростання теплопровідності ущільненої ГП [117]. В наслідок цього швидкість

розповсюдження повздовжніх та поперечних хвиль стиснення та розрідження обмежується. Хвилеподібні теплові напруження всередині ГП згасають, що перешкоджає розвитку деформацій та руйнування. Отже запропонована модель свідчить про те, що температура вибуху не є самостійним рушійним чинником, а лише допоміжним.

Отримано спадаючу експоненціальну залежність енергоємності руйнування ГП від тиску КВЯ, рис. 3.2 г. Ділянка від 0 ГПа до 0,2 ГПа відзначається зниженням енергоємності з тангенсом кута падіння  $\text{tg}(39^\circ)=0,80$ . Енергоємність на першій ділянці знизилась: з 286 кВт·год/м<sup>3</sup> до 278 кВт·год/м<sup>3</sup> для габро; з 243 кВт·год/м<sup>3</sup> до 237 кВт·год/м<sup>3</sup> для граніту; з 206 кВт·год/м<sup>3</sup> до 197 кВт·год/м<sup>3</sup> для пісковика. Внаслідок зростання тиску до 0,2 ГПа КВЯ відколює мінерали з поверхневого шару ГП. Це призводить до виникнення магістральних тріщин та локального подрібнення ГП. Відповідно знижується питома енергоємність руйнування ГП.

На ділянці від 0,2 ГПа до 0,5 ГПа спостерігається згладжування залежності з тангенсом кута падіння  $\text{tg}(28^\circ)=0,53$ . Енергоємність знижується з 278 кВт·год/м<sup>3</sup> до 273 кВт·год/м<sup>3</sup> для габро; з 237 кВт·год/м<sup>3</sup> до 230 кВт·год/м<sup>3</sup> для граніту; зі 197 кВт·год/м<sup>3</sup> до 191 кВт·год/м<sup>3</sup>. Згладжування залежності пояснюється ущільненням ГП. Згідно з [118] збільшення тиску на ГП викликає пластичні деформації кристалів ГП. Це призводить до часткового зникнення дефектів ГП, що викликає її ущільнення.

Результати моделювання порівняно з відомими експериментальними дослідженнями [119-123]. Встановлено, що запропонована модель адекватно описує геомеханічні процеси, які протікають під час руйнування ГП комбінованими вибухо - механічними навантаженнями. Дослідження [119] вказують на пропорційне зростання швидкості руйнування граніту та мармуру від кількості ударних навантажень. Відповідно знижується питома енергоємність руйнування, як видно з отриманої аналітичної залежності, рис. 3.1 а.



В роботах [120, 121] Іюффе А. Ф. довів, що зростання температури твердих тіл знижує межу текучості та руйнування відбувається з пластичними деформаціями. При цьому збільшення швидкості навантаження до 4 км/с сприяє компенсації крихких властивостей ГП при температурі 3000...4000 К. Тому ГП може руйнуватися без пластичних деформацій, що видно з рис. 3.2 в.

В експериментальних роботах [122] підтверджено, що вплив навантаження до 300 МПа на граніт та пісковик зі частотою 0,1 Гц до 3 МГц призводить до динамічного зміцнення ГП. При цьому межа міцності тим нижче, чим вища швидкість навантаження. Подальше зростання швидкості навантаження призводить до знеміцнення ГП за експоненціальним законом, що підтверджується залежністю, рис. 3.1 б.

Результати математичного моделювання (рис. 3.2 г) підтверджено відомими експериментами [123]. Авторами доведено зниження енергоємності руйнування мармуру майже в 2 рази при збільшенні тиску ударного навантаження з 10 МПа до 35 МПа [123].

## **Висновки**

1. Встановлено, що вплив комбінованих вибухо - механічних навантажень формує комплексну тріщинуватість гірських порід. Досягається доповнення природної тріщинуватості внесеною технологічною внаслідок дії кумулятивного вибухового ядра, що характеризується температурою, тиском та швидкістю навантаження.

2. Вперше розроблено математичну модель енергоємності руйнування гірських порід, яка відрізняється від відомих тим, що ураховує параметри вибухо-механічного навантаження вибою і сукупність дії його природної та внесеної технологічної тріщинуватостей;

3. Встановлено та перевірено експоненціальні залежності енергоємності руйнування гірських порід від:

- частоти навантажень вибою кумулятивним вибуховим ядром - енергоємність руйнування знизилась: з 297 до 274 кВт·год/м<sup>3</sup>, або на 7 % для габро; з 250 до 228 кВт·год/м<sup>3</sup>, або на 9 % для граніту; з 211 до 191 кВт·год/м<sup>3</sup>, або на 9 % для пісковика;

- швидкості кумулятивного вибухового ядра (логарифмічно-експоненціальний характер) - енергоємність руйнування знизилась: з 286 до 272 кВт·год/м<sup>3</sup>, або на 5 % для габро; 248 до 227 кВт·год/м<sup>3</sup>, або на 8 % для граніту; з 206 до 187 кВт·год/м<sup>3</sup>, або на 9 % для пісковика;

- температури вибуху - енергоємність руйнування знизилась: з 296 до 272 кВт·год/м<sup>3</sup>, або на 8 % для габро; з 250 до 230 кВт·год/м<sup>3</sup>, або на 8 % для граніту; з 211 до 190 кВт·год/м<sup>3</sup>, або на 10 % для пісковика;

- тиску кумулятивного вибухового ядра - енергоємність руйнування знизилась: на 5 % від 286 кВт·год/м<sup>3</sup>, для габро; на 8 % від 248 кВт·год/м<sup>3</sup>, для граніту; на 7 % від 206 кВт·год/м<sup>3</sup>, для пісковика;

4. Результати досліджень за розділом опубліковано в: [124] – аналіз критеріїв руйнування ГП щодо енергоефективності; [125] – математичне моделювання вибухо-механічного руйнування ГП.

## РОЗДІЛ 4

### ВИБУХО - МЕХАНІЧНЕ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД

#### 4.1 Апробація вибухо-механічного руйнування

Розроблено новий спосіб комбінованого руйнування ГП [97]. Для його реалізації, в Інституті надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля, створено конструкцію ріжучого інструмента вибухо-механічної дії, рис. 4.1. Корпус ріжучого інструмента виготовлено з загартованої сталі марки 35ХГСА діаметром 36 мм. Різці – з вольфрам-кобальту марки ВК15, що дозволяє руйнувати ГП з  $f \geq 15$  в. о. [126].



Рис. 4.1. Ріжучий інструмент вибухо-механічної дії: 1 – технологічні різки для відведення продуктів детонації; 2 – різці твердосплавні; 3 – отвір для подачі зарядів вибухової речовини

Згідно з [67] для збільшення ефекту Манро заряд необхідно розташовувати на фокусній відстані півсфери від поверхні вибою. Цю відстань забезпечують різці твердосплавні, рис. 4.1, що виступають на 5,0 мм поза тіло корпусу. КВЯ встигає сформуватися та здатне досягти максимальної швидкості (5...10 км/с) і тиску ( $\approx 10$  ГПа) [67], навантажуючи вибій.

Для формування концентрованих вибухових навантажень, направлених на вибій (ефект Манро [67]), виготовлено заряди ВР, рис. 4.2.

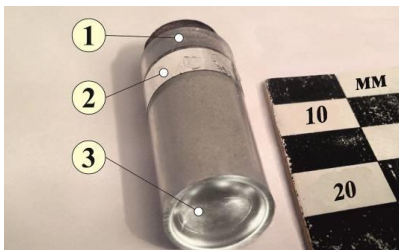


Рис. 4.2. Заряд вибухової речовини для формування кумулятивного вибухового ядра: 1 – забійка; 2 – електродне кільце; 3 – алюмінієве облицювання

Заряди мають циліндричну форму з алюмінієвим облицюванням товщиною 0,3 мм, згідно з вимогами [67]. Матеріалом облицювання є алюміній, що на 20 % збільшує швидкість концентрованих вибухових навантажень [67] ніж при використанні міді. Алюмінієве облицювання вкрито оксидною плівкою, тому не реагує з компонентами ВР. Облицювання 3, рис. 4.2, виготовлено у формі півсфери, що концентрує КВЯ в напрямку вибою. Ударний ефект КВЯ є на 20 % стійкішим ніж ефект кумулятивного струменю під час обертання ріжучого інструмента [67, 127]. Вибір півсферичного облицювання також обґрунтовано наступними експериментами. Вапняковий пісковик навантажено двома зарядами ВР – з конусним та півсферичним облицюванням. В результаті встановлено, що конусне облицювання формує кратер конусної форми діаметром 10...12 мм, глибиною 2...3 мм. Півсферичне облицювання забезпечує утворення циліндричного кратера діаметром 12...15 мм глибиною 3 мм. Отже при використанні півсферичного облицювання об'єм руйнування більший ніж при конусному.

Електродне кільце 2 зв'язане з електронним запалом всередині заряду та забезпечує його ініціювання в продувному каналі ріжучого інструменту, дивись

розділ 2. Маса ВР складає 0,45 гр, щільність заряджання - 500 кг/м<sup>3</sup>. У якості ВР обрано суміш магнію Mg та перхлорату калію KClO<sub>4</sub>. теплотворна здатність магнію 25 кДж/кг [128] забезпечує зростання температури вибуху до 4080 К. Завдяки температурі займання 800 К [129], перхлорат калію одночасно характеризується легкістю ініціювання. Чотири атоми кисню у складі перхлорату калію забезпечують утворення газоподібних речовин під час детонації у суміші з магнієм. Співвідношення Mg та KClO<sub>4</sub> обрано 30 % до 70 %. При такому співвідношенні скорочується час детонації до 0,04 с [130], а отже зростає швидкість навантажень вибою. Суміш є стійкою до механічного впливу, тобто придатна до механізованого заряджання. Не втрачає детонаційних властивостей під час тривалого зберігання. Згідно з даними Міжнародної спілки інженерів-підричників [131] ВР на основі перхлоратів застосовуються в шахтах і на кар'єрах США. Їх частка у складі ВР складає понад 30 % [131]. Відоме [131, 132] застосування сумішей на основі перхлоратів для інтенсифікації нафтових та газових свердловин. ВР на основі перхлорату калію планують застосовувати для відокремлення монолітних блоків скельних ГП на кар'єрах України [87].

Вибухові навантаження проведено в спеціальній камері, рис. 4.3.



Рис. 4.3. Вибухова камера: 1 – металева ємність; 2 – система вентиляції; 3 – зразок гірської породи. Крок мірної лінійки 10 мм

Камера знаходиться у відділені геодинаміки вибуху Інституту геофізики ім. С. І. Суботіна. У камері розміщено металеву ємність 1 діаметром 0,7 м.

Ємність наповнена піском для зменшення вібрацій від вибуху. Відведення продуктів детонації забезпечила системи вентиляції 2, рис. 4.3. Зверху камера щільно зачиняється, ізолюючи лабораторію від джерела вибуху.

Для проведення експериментів з використанням вибуху виготовлено камеру фокусування КВЯ на вибій, рис. 4.4. Камера виготовлена з легованої сталі 35ХГСА, має зовнішній діаметр 36 мм, що відповідає типорозміру ріжучого інструменту типу КДП згідно з ГОСТ 17196-77. Всередині камери сформовано отвір діаметром 11 мм для щільного розміщення заряду діаметром 10 мм. З протилежного боку камери отвір звужується до 3 мм, для зниження витрат енергії вибуху, що імітує роботу зворотного клапану в продувному каналі, розділ 2. Заряд ВР 4 заглиблено на 5 мм від торцевої поверхні камери (з отвором діаметром 10 мм) для створення фокусної відстані від зразків ГП. Під час вибухо-механічного руйнування цю відстань забезпечують висотою різців 5 мм. Так забезпечується імітація знаходження заряду ВР в продувному каналі ріжучого інструменту.

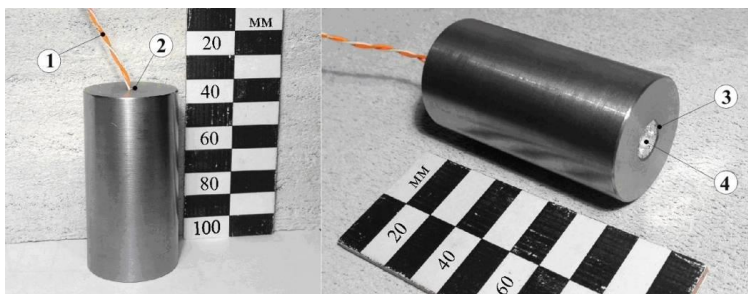


Рис. 4.4. Камера фокусування кумулятивного вибухового ядра на вибій: 1 – дрони електронного запалу; 2 – отвір для дротів діаметром 3 мм; 3 – отвір для заряду діаметром 11 мм; 4 – заряд вибухової речовини

Вибухо-механічне руйнування зразків ГП проведено на експериментальному пристрої, рис. 4.5. Пристрій призначено для формування шпурів в ГП, або будівельних матеріалах комбінованими вибухо-механічними

навантаженнями. Область використання пристрою охоплює гірничу та будівельну сфери промисловості. Промислові зразки пристрою можуть застосовуватись на кар'єрах, під час проходки тунелів. В шахтах І категорії (метаноемність до 5 м<sup>3</sup>/т) за умови концентрації метану на вибої не більше 1 % згідно з [133].

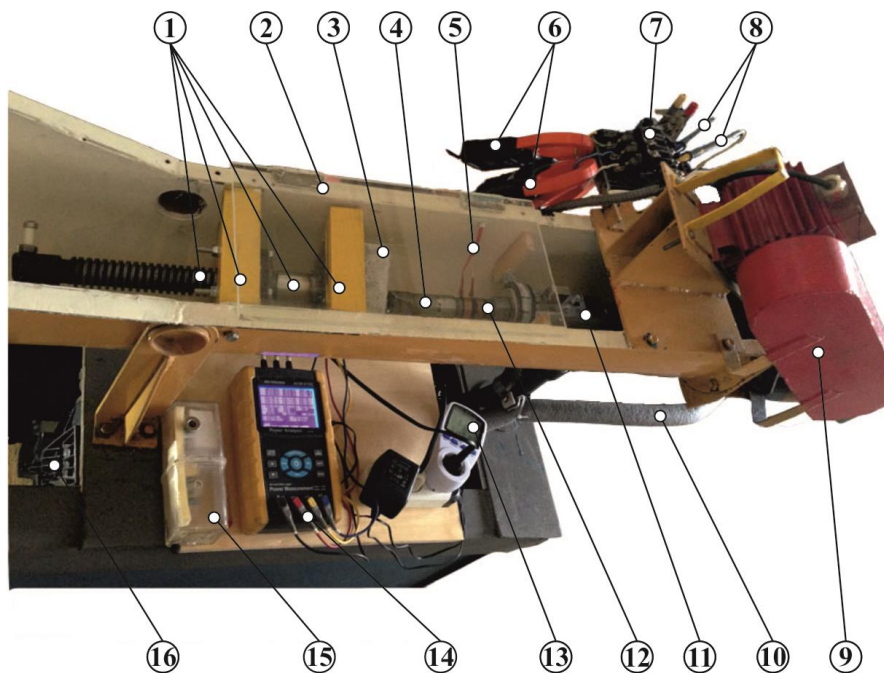


Рис. 4.5. Експериментальний пристрій: 1 – модель вибою; 2 – захисний екран; 3 – зразок гірської породи; 4 – ріжучий інструмент комбінованої дії; 5 – електроди для подачі напруги 220 В на вибій; 6 – кліщі струмові; 7 – магнітний пускач; 8 – тестові пробники; 9 – електричний привід; 10 – шланг для подачі стисненого повітря в продувний канал; 11 – вертлюг модифікований; 12 – контактні пластини передачі напруги на вибій; 13 – ватметр EU TS-836A, 220 В; 14 – аналізатор електромережі Актаком АСМ 3192; 15 – блок управління компресором; 16 – компресор.

Електричний привід 9 складається з електродвигуна та редуктора (розділ 2). Це забезпечує обертання ріжучого інструменту 4 з рекомендованою ВІТР [93] кутовою швидкістю 22 рад/с. Модифікований вертлюг 11 (розділ 2) забезпечує потрапляння стисненого повітря та зарядів ВР на вибій. До складу вертлюга входить касета (розділ 2), призначена для спорядження зарядами ВР у кількості 3 штуки. Оскільки електродвигун нерухомий, виготовлено систему подачі зразків ГП (модель вибою 1), що складається з: ручки гвинта, гвинта з фланцем, платформи. Магнітний пускач 7 забезпечує пуск та вимикання електродвигуна. Вимірювання витрат електроенергії електродвигуном та компресором відбувалось за допомогою аналізатора електромережі 14 (Актаком АСМ 3192) та ватметром 13 (EU TS-836A) відповідно.

Принцип дії полягає у наступному. За допомогою магнітного пускача 7 запускається електричний привід 9. Встановлюється кутова швидкість 22 рад/с, що рекомендована під час обертального руйнування ГП [93]. Обертанням ручки гвинта моделі вибою 1 до ріжучого інструменту подається платформа зі зразком ГП 3. Зусилля подачі фіксується на рівні 2,4 кН згідно з рекомендаціями [93], розділ 2. Після початку руйнування ручка затвору 9 зводиться механічно для подачі заряду ВР до продувного каналу. Під тиском стисненого повітря заряд ВР просувається до ріжучого інструмента 4. Детонація відбувається внаслідок контакту електродного кільця заряду (рис. 4.2) з електродами в каналі ріжучого інструменту. Напруга підводиться електродами 5, розділ 2. При цьому знімаються показники аналізатора електромережі та ватметра для розрахунку енергоємності. Після досягнення необхідної глибини руйнування, магнітним пускачем 7 пристрій вимикається. За отриманими показниками потужності, часом руйнування та розмірами сформованого шпура визначається питома енергоємність руйнування. Недоліками експериментального пристрою є відсутність системи автоматичного взводу затвору та подачі зразків ГП до ріжучого інструмента. Ці недоліки ураховано та виправлено під час промислової апробації, розділ 5.



## 4.2 Результати вибухо-механічного руйнування

Для апробації вибухо-механічного руйнування гірських порід виготовлено зразки габро, граніту та пісковика (розділ 2), рис. 4.6.

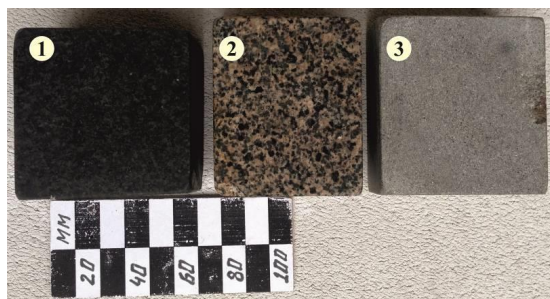


Рис. 4.6. Зразки гірських порід для апробації: 1 – габро; 2 – граніт; 3 – пісковик

В Інституті геофізики згідно з ГОСТ 30629-99 визначено мінералогічний склад та фізико-механічні властивості зразків ГП, таблиця 4.1.

Таблиця 4.1

### Фізико-механічні властивості зразків гірських порід

Гірська порода	Щільність $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Межа міцності на стиснення $\sigma_{ст}$ , МПа	Пористість $\eta$ , %	Анізотропія $A$ , %
1	3	4	5	6
Габро	3030	220	0,3...0,9	0,47
Граніт	2680	180	1,1...1,6	0,35
Пісковик	2600	130	2,9...3,1	1,00

Склад габро: плагіоклаз (лабрадор) – 63...65 %; піроксен (авгіт) – 27...29 %; апатит – 4 %; кварц – 0,5 %. Склад граніту: мікроклін (калієвий польовий шпат) – 35...40 %; амфібол (рогова обманка) – 20...30 %; плагіоклаз (альбіт) – 12...15 %; кварц – 16 ... 20 %; біотит – 2...3 %. Пісковик складається

з кварц-польовішпатного уламкового матеріалу з розміром зерен 0,10...0,25 мм, що зцементований глинисто-слюдистим та карбонатним цементом.

Щоб встановити раціональний діапазон частоти навантажень вибою вибуховим КВЯ проведено ряд експериментів. Зокрема зразки ГП (рис. 4.6), в результаті дії вибуху зарядів (рис. 4.1), перевірені на появу технологічної тріщинуватості, її кількість, глибину та напрямок. Для цього застосовано методи неруйнівного контролю [91]: ультразвуковий, індентування, оптичний, рентгеноскопічний, капілярний.

Ультразвуковий метод неруйнівного контролю [91] в зразках ГП проведено на базі установки УИСУ-01 згідно з ГОСТ 21153.7-75, рис. 4.7. Частота ультразвукових коливань установки в межах 5,0 ... 10,0 МГц, діапазон вимірювань швидкості ультразвукових хвиль становить 1,7...7,0 км/с. Використано метод тіньової дефектоскопії [91], коли випромінювач та приймач ультразвукових хвиль розташовані на одній акустичній вісі з протилежних сторін зразка. Результати вимірювань відображають пружні властивості зразків по всій товщині. Випромінювання та приймання хвиль охоплює діаметр 36 мм, що співрозмірно з діаметром ріжучого інструменту комбінованої дії, рис. 4.1.

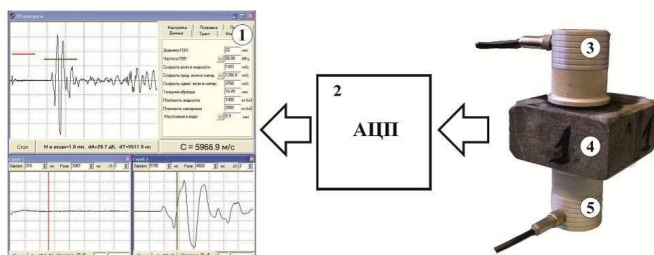


Рис. 4.7. Установка для вимірювання швидкості ультразвукових хвиль в зразках гірських порід: 1 – осцилографічний екран програмного забезпечення «УЗ контроль»; 2 – аналогово-цифровий перетворювач; 3 – випромінювач ультразвукових коливань; 4 – зразок гірських порід; 5 – приймач ультразвукових хвиль

Встановлено необхідне число вимірювань швидкості ультразвукових хвиль ( $V$ ) в зразках ГП для отримання значень з розрахунком ступенем точності. Вибірку вже виміряних значень  $V$  для габро, внесені до таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

**Значення швидкості ультразвукових хвиль у зразках гірських порід**

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_i$ , м/с	6746	6750	6762	6769	6774	6772	6765	6748	6745	6761
$(V_i - V)^2$ , м/с	400	100	4	81	196	144	25	144	225	1

де  $V_i$  - показання приладу, м/с;  $V$  - теоретично задане значення (у даному випадку  $V = 6760$  м/с [118]).

Середньоквадратичне відхилення  $D_{CP}$ :

$$D_{CP} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (V_i - V)^2}{n \cdot (n-1)}} = \sqrt{\frac{(6746-6760)^2 + (6750-6760)^2 + \dots + (6745-6760)^2 + (6761-6760)^2}{10 \cdot (10-1)}} =$$

$$= \sqrt{\frac{400+100+\dots+225+1}{10 \cdot 9}} = 3,80 \text{ м/с.} \quad (4.1)$$

За максимально припустиму похибку прийнято  $\Delta = \pm 10$  м/с.

Коефіцієнт Стюдента:

$$t = \frac{\Delta}{D_{CP}} = \frac{10}{3.80} = 2.63. \quad (4.2)$$

За таблицею 4.3 виділено необхідне число вимірів ( $n$ ) із заданою точністю  $\Delta = \pm 10$  м/с. Результат заносимо в таблицю 4.4.

Таблиця 4.3

**Коефіцієнти довірчої ймовірності за розподілом Стюдента**

n – число вимірювань	Коефіцієнт довірчої ймовірності $K_c(n, W)$						
	W – довірна ймовірність						
	0,90000	0,95000	0,97000	0,99000	0,99500	0,99865	0,99900
1	2	3	4	5	6	7	8
2	3,08	6,31	10,6	31,8	63,7	235,8	318,3
3	1,89	2,92	3,90	6,96	9,92	19,2	22,3
4	1,64	2,35	2,95	4,54	5,84	9,22	10,2
5	1,53	2,13	2,60	3,75	4,60	6,62	7,17
6	1,48	2,02	2,42	3,36	4,03	5,51	5,89
7	1,44	1,94	2,31	3,14	3,71	4,90	5,21
8	1,41	1,89	2,24	3,00	3,50	4,53	4,79
9	1,40	1,86	2,19	2,90	3,36	4,28	4,50
10	1,38	1,83	2,15	2,82	3,25	4,10	4,30
11	1,37	1,81	2,12	2,76	3,17	3,96	4,14
12	1,36	1,80	2,10	2,72	3,11	3,85	4,02
13	1,36	1,78	2,08	2,68	3,05	3,76	3,93
14	1,35	1,77	2,06	2,65	3,01	3,69	3,85
15	1,35	1,76	2,05	2,62	2,98	3,63	3,79
16	1,34	1,75	2,03	2,60	2,95	3,59	3,73
17	1,34	1,75	2,02	2,58	2,92	3,54	3,69
18	1,33	1,74	2,02	2,57	2,90	3,51	3,65
19	1,33	1,73	2,01	2,55	2,88	3,48	3,61
20	1,33	1,73	2,00	2,54	2,86	3,45	3,58
21	1,33	1,72	1,99	2,53	2,85	3,42	3,55
22	1,32	1,72	1,99	2,52	2,83	3,40	3,53
23	1,32	1,72	1,98	2,51	2,82	3,38	3,50
24	1,32	1,71	1,98	2,50	2,81	3,36	3,49
25	1,32	1,71	1,97	2,49	2,80	3,34	3,47
26	1,32	1,71	1,97	2,49	2,79	3,33	3,45
27	1,31	1,71	1,97	2,48	2,78	3,31	3,43
28	1,31	1,70	1,96	2,47	2,77	3,30	3,42
29	1,31	1,70	1,96	2,47	2,76	3,29	3,41
30	1,31	1,70	1,96	2,46	2,76	3,28	3,40
31	1,31	1,70	1,95	2,46	2,75	3,27	3,39
33	1,31	1,69	1,95	2,45	2,74	3,25	3,36
35	1,31	1,69	1,95	2,44	2,73	3,24	3,35
37	1,31	1,69	1,94	2,43	2,72	3,22	3,33
39	1,30	1,69	1,94	2,43	2,71	3,21	3,32
41	1,30	1,68	1,94	2,42	2,70	3,20	3,30
43	1,30	1,68	1,93	2,42	2,70	3,19	3,30
45	1,30	1,68	1,93	2,41	2,69	3,18	3,29
47	1,30	1,68	1,93	2,41	2,69	3,17	3,28
49	1,30	1,68	1,93	2,41	2,68	3,16	3,27
51	1,30	1,68	1,92	2,40	2,68	3,16	3,26
56	1,30	1,67	1,92	2,40	2,67	3,14	3,25
61	1,30	1,67	1,92	2,39	2,66	3,13	3,23

### Закінчення таблиці 4.3

1	2	3	4	5	6	7	8
66	1,29	1,67	1,91	2,39	2,65	3,12	3,22
71	1,29	1,67	1,91	2,38	2,65	3,11	3,21
81	1,29	1,66	1,91	2,37	2,64	3,10	3,19
91	1,29	1,66	1,90	2,37	2,63	3,08	3,18
101	1,29	1,66	1,90	2,36	2,63	3,08	3,17
121	1,29	1,66	1,90	2,36	2,62	3,06	3,16
151	1,29	1,66	1,90	2,35	2,61	3,05	3,14
201	1,29	1,65	1,89	2,35	2,60	3,04	3,13

Таблиця 4.4

### Необхідне число вимірів (n) із заданою точністю $\Delta = \pm 10$ м/с

Імовірність одержання результату з заданою похибкою	Кількість дослідів при $\Delta = \pm 10$ м/с ( $t=2.63$ )
1	2
90,0 %	$\leq 3$
95,0 %	$\leq 4$
97,0 %	$\leq 5$
99,0 %	$\leq 15$
99,5 %	$\leq 101$
99,9 %	$\geq 500$

За розподілом Стюдента достатня кількість вимірювань швидкості ультразвукових хвиль в зразках ГП рівна 5 при довірчій імовірності 95 % та коефіцієнті Стюдента 2,63. Загальна кількість вимірювань - 60.

Спочатку вимірювання швидкості ультразвукових хвиль проведено для непошкоджених зразків  $V_0$ , таблиця 4.5. Потім для зразків з внесеною технологічною тріщинуватістю в результаті впливу КВЯ частотою 4 виб/хв, 12 виб/хв та 24 виб/хв. Як наслідок отримано значення швидкості ультразвукових хвиль ( $V_1 \dots V_6$ ) в зразках з різною комплексною тріщинуватістю. Результати вимірювань внесені до таблиці 4.5.

Таблиця 4.5

**Значення швидкості ультразвукових хвиль в зразках гірських порід**

Зразки гірських порід	Товщина зразка, мм	Швидкість ультразвукових хвиль в зразках гірських порід, м/с			
		$V_0$	$V_1$	$V_2$	$V_3$
1	2	3	4	6	9
<b>Габро</b>					
Зразок 1	31,47	6711	6617	6600	6538
<b>Граніт</b>					
Зразок 1	39,00	5369	5266	5246	5204
<b>Пісковик</b>					
Зразок 1	33,65	4377	4298	4315	4035

Для зручності аналізу отриманих результатів побудовано криві залежностей швидкості ультразвукових хвиль від частоти навантажень вибою КВЯ, рис. 4.8.

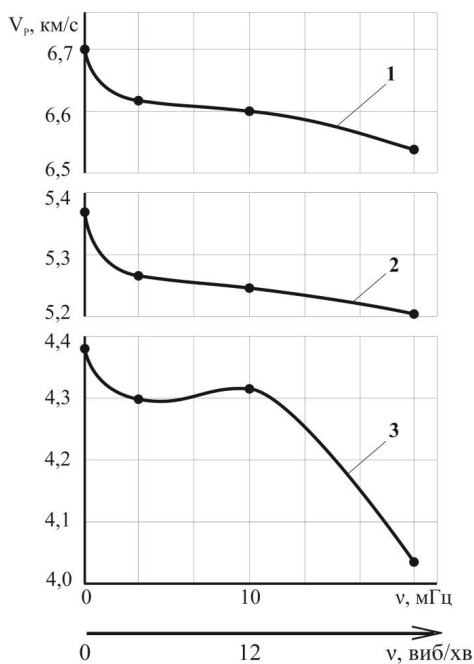


Рис. 4.8. Залежність швидкості ультразвукових хвиль в зразках гірських порід від частоти навантажень вибою кумулятивним вибуховим ядром: 1 – габро; 2 – граніт; 3 – пісковик

Залежності швидкості ультразвукових хвиль від частоти навантажень вибою КВЯ поділяються на 3 ділянки. Перша ділянка (частота навантажень від 0 до 4 виб/хв) характеризується експоненціальним падінням кривої зі зниженням швидкості ультразвукових хвиль приблизно на 100 м/с для усіх зразків ГП. Це викликано руйнуванням поверхні зразків ГП з формуванням зколів та мікротріщин. Пластичні властивості окремих мінералів не встигають реалізуватися завдяки близькості до епіцентру вибуху. Пластичні деформації перетворюються на квазіпластичні та крихкі під впливом швидкості навантажень КВЯ  $\approx 5$  км/с [67]. Внаслідок вибуху продукти детонації нагнітаються в мікротріщини, поглиблюючи їх та відколюють зерна окремих мінералів ГП. На поверхні зразків утворюються зколи глибиною до 0,5 мм та формуються технологічні мікротріщини. Тангенс кута падіння для зразків габро та граніту  $\text{tg}(20^\circ) = 0,36$  майже в 2 рази нижчий ніж у пісковика  $\text{tg}(40^\circ) = 0,84$ . Це пояснюється переважанням пластичних властивостей пісковика у порівнянні з габро та гранітом завдяки глинистому середовищу.

Під час руйнування поверхневих шарів в зразках ГП (перша ділянка, частота навантажень від 0 до 4 виб/хв) під внесеною технологічною тріщинуватістю формується область ущільнення 2, рис. 4.20 б. Про це свідчить друга ділянка від 4 до 12 виб/хв. Так для зразків габро та граніту продовжується падіння, але більш полого з тангенсом кута  $\text{tg}(85^\circ) = 11,43$ . Ущільнення пояснюється наявністю пластичних мінералів у складі зразків ГП: у габро - плагіоклаз; у граніті – мікроклін. Температура продуктів детонації викликає пластичні деформації плагіоклазу та мікрокліну, температура плавлення яких не перевищує 1800 К та 1500 К [134] відповідно. Наявність пластичного глинистого середовища та пористості 2,9...3,1 % у структурі пісковика зумовило його ущільнення. Що відображається зростанням функції з тангенсом кута  $\text{tg}(73^\circ) = 3,27$ . Адекватність такої поведінки пісковика підтверджена дослідями [135], де зафіксовано перехід від крихкої деформації до в'язкої (пластичної) зі зростанням навантаження.

Зі стисненням лабрадора та мікрокліна їх напружений стан зростає, і при досягненні межі міцності на стиснення 120...170 МПа [134] вони руйнуються. Коефіцієнт комплексної тріщинуватості збільшується, про що свідчить третя ділянка (частота навантажень від 12 до 24 виб/хв), де відбувається падіння функції. Для габро та граніту кути падіння майже рівні з тангенсами  $\text{tg}(76^\circ) = 4,00$  та  $\text{tg}(84^\circ) = 6,31$ . Межа міцності основного мінерала глинистого середовища пісковика каолініта не перевищує 60 МПа [134]. Тому третя ділянка для пісковика відзначається падінням функції з тангенсом кута  $\text{tg}(37^\circ) = 0,75$ .

Згідно з аналізом залежностей (рис. 4.8) частота навантажень КВЯ від 0,2 до 0,4 Гц (12...24 виб/хв) характеризується початком руйнування зразків ГП. А роботою передбачено лише послаблення ГП навантаженнями КВЯ. Тому обрано раціональний діапазон частоти навантажень КВЯ від 0 до 0,4 Гц.

За значеннями швидкості ультразвукових хвиль в зразках ГП у непошкодженому стані розраховано анізотропію, таблиця 4.1. Згідно з [118] розрахована анізотропія непошкоджених зразків ГП за значеннями швидкостей ультразвукових хвиль у трьох взаємно перпендикулярних площинах:

$$A = \left[ \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\text{ср}}} \right] \cdot 100, \quad (4.3)$$

де  $V_{\max} = 6711; 5369; 4377$  - найбільші значення швидкості ультразвукових хвиль, відповідно для габро, граніту, пісковика, м/с;  $V_{\min} = 6679; 5350; 4332$  - найменші значення швидкості ультразвукових хвиль, відповідно для габро, граніту, пісковика, м/с;  $V_{\text{ср}} = 6695; 5359; 4354$  - середні значення швидкості ультразвукових хвиль, відповідно для габро, граніту, пісковика, м/с.

Анізотропія для зразків габро рівна 0,47 %, для зразків граніту - 0,35 %, для зразків пісковика - 1,1 %. Значення для пісковика майже в 2 рази більше ніж для граніту та габро. Це пов'язано з наявністю видимих магістральних



тріщин та пластичного глинистого середовища. В цілому отримані значення свідчать про однорідність зразків ГП. Тому розповсюдження технологічних тріщин в зразках є рівномірним в заданому напрямку, що підтверджують результати рентгеноскопії, рис. 4.18б...4.20 б.

Під час вимірювань швидкості ультразвукових хвиль зафіксовано, що амплітуда сигналу зменшилась з 14,0 до 8,0 дБ. Згідно з [136], коефіцієнт затухання сигналу від 0,6 до 1,0 свідчить про наявність тріщин з кутом від 50° до 90°. Ці тріщини можна вважати вертикальними. Вибухові навантаження поглиблюють та розвивають системи технологічної тріщинуватості. На поверхні зразків з'являється рельєфність з утворенням впадин та нерівностей, рис. 4,15...4,17 а, б. Різці ріжучого інструменту здатні чіплятися за них, покращуючи руйнівний ефект.

Оскільки загальний опір ГП деформаціям під дією вибухо – механічних навантажень характеризує модуль пружності І роду, виникла необхідність його визначення. Фіксація зміни модуля від частоти навантажень вибою КВЯ в зразках ГП проведено мікротвердоміром «Мікрон-гамма» згідно з ISO 14577-1:2002(E), рис. 4.9.

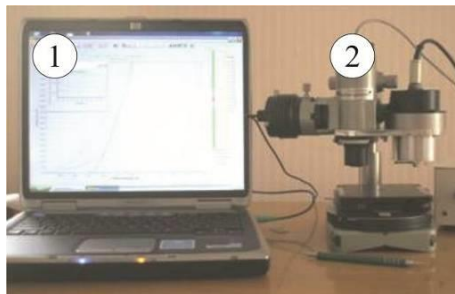


Рис. 4.9. Пристрій для вимірювання модуля пружності І роду: 1 – електронно-обчислювальна машина з програмним забезпеченням «Мікрон-гамма»; 2 - мікротвердомір «Мікрон-гамма»

Встановлено необхідне число вимірювань модуля пружності I роду ( $E$ ) для отримання значень з розрахованим ступенем точності. Вибірку вже виміряних значень  $E$  для габро, внесені до таблиці 4.6.

Таблиця 4.6

**Значення модуля пружності I роду для габро**

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$E_i$ , ГПа	115	122	109	111	118	125	123	116	116	119
$(E_i - E)^2$ , ГПа	25	4	121	81	4	25	9	16	16	1

де  $E_i$  - показання приладу, ГПа;  $E$  - теоретично задане значення (у даному випадку  $E = 120$  ГПа [118]).

Середньоквадратичне відхилення  $D_{CP}$ :

$$D_{CP} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (E_i - E)^2}{n \cdot (n-1)}} = \sqrt{\frac{(115-120)^2 + (122-120)^2 + \dots + (116-120)^2 + (119-120)^2}{10 \cdot (10-1)}} =$$

$$= \sqrt{\frac{25+4+\dots+16+1}{10 \cdot 9}} = 3,35 \text{ ГПа.} \quad (4.4)$$

За максимально припустиму похибку прийнято  $\Delta = \pm 10$  ГПа.

Коефіцієнт Стьюдента:

$$t = \frac{\Delta}{D_{CP}} = \frac{10,00}{3,35} = 2,98. \quad (4.5)$$

За таблицею 4.3 визначаєм необхідне число вимірів ( $n$ ) із заданою точністю  $\Delta = \pm 10$  ГПа та коефіцієнті Стьюдента 2,98 в.о. Отримані значення заносимо до таблиці 4.7.

Таблиця 4.7

**Необхідне число вимірів (n) із заданою точністю  $\Delta = \pm 10$  ГПа**

Імовірність одержання результату з заданою похибкою	Кількість дослідів при $\Delta = \pm 10$ ГПа ( $t=2.98$ )
1	2
90,0 %	$\leq 2$
95,0 %	$\leq 3$
97,0 %	$\leq 4$
99,0 %	$\leq 9$
99,5 %	$\leq 15$
99,9 %	$\geq 500$

Вимірювання у кількості 4 з довірчою імовірністю 97 % є достатнім для визначення модуля пружності I роду зразків ГП. Результати вимірювань виводяться у вигляді діаграм навантажень та таблиць зі значеннями модуля пружності I роду, рис 4.10-4.25.

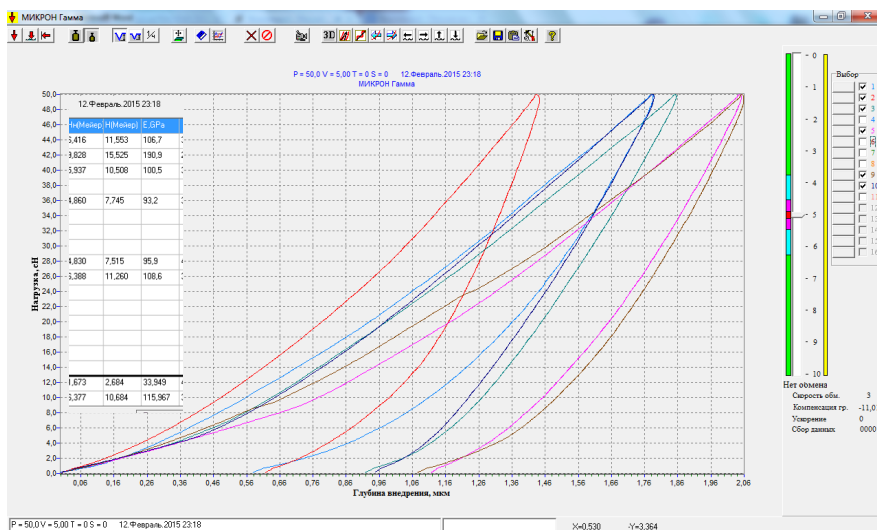


Рис. 4.10. Габро до навантажень кумулятивним вибуховим ядром

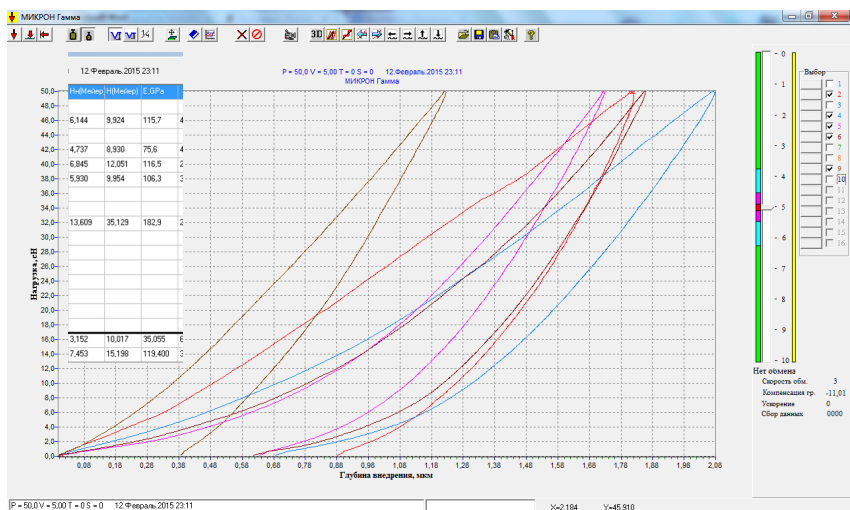


Рис. 4.11. Габро при частоті навантажень кумулятивним вибуховим ядром 4 виб/хв.

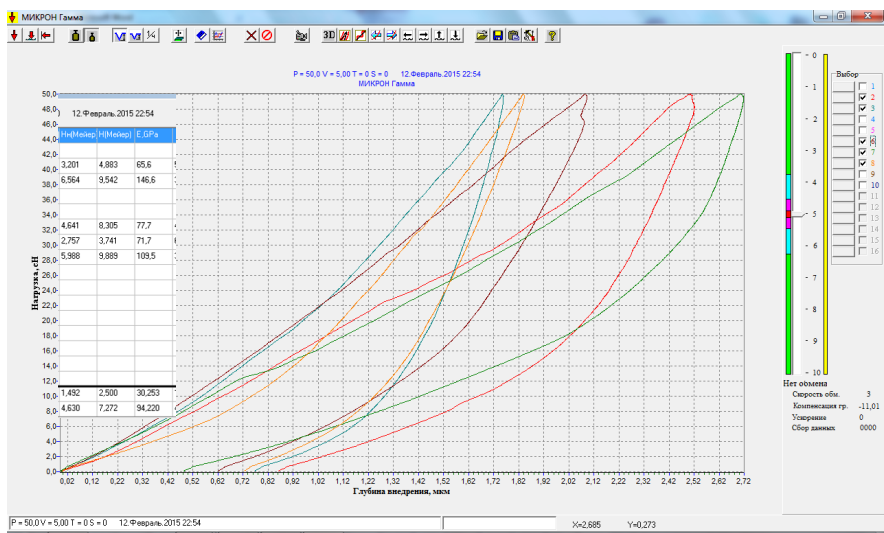


Рис. 4.12. Габро при частоті навантажень кумулятивним вибуховим ядром 12 виб/хв.



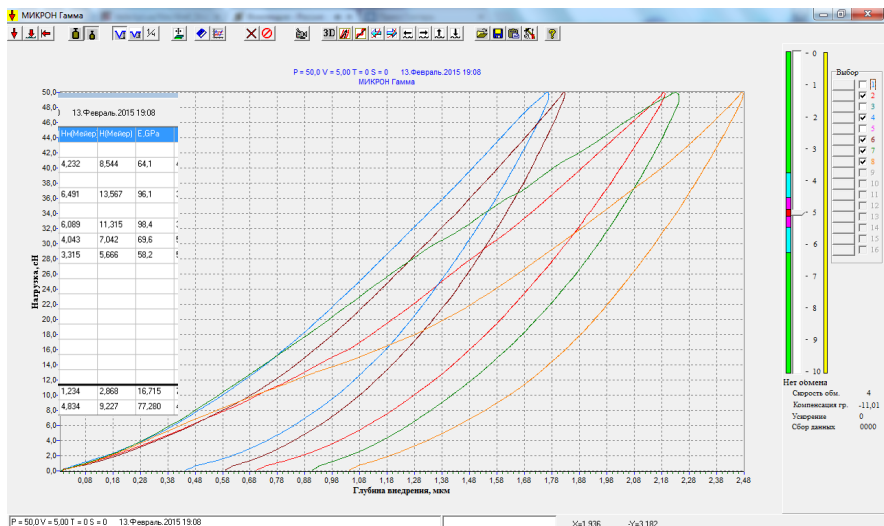


Рис. 4.15. Мікроклін граніту при частоті навантажень кумулятивним вибуховим ядром 4 виб/хв

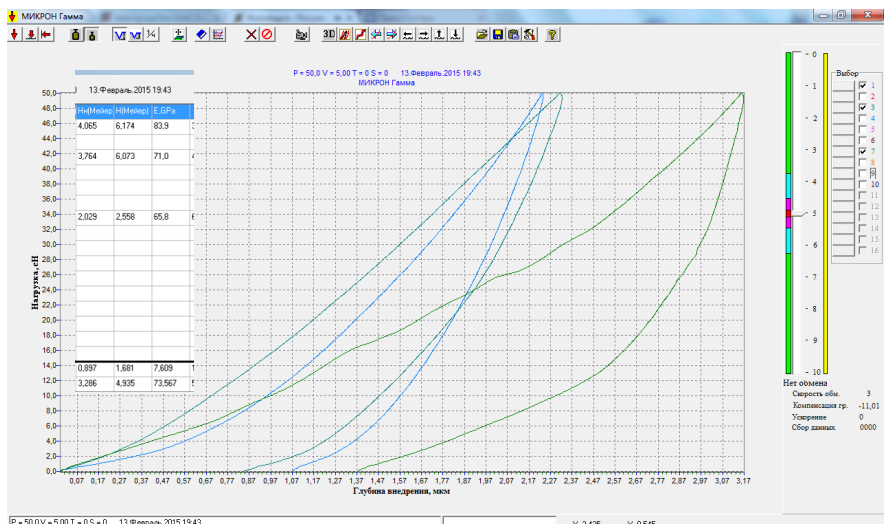


Рис. 4.16. Мікроклін граніту при частоті навантажень кумулятивним вибуховим ядром 12 виб/хв

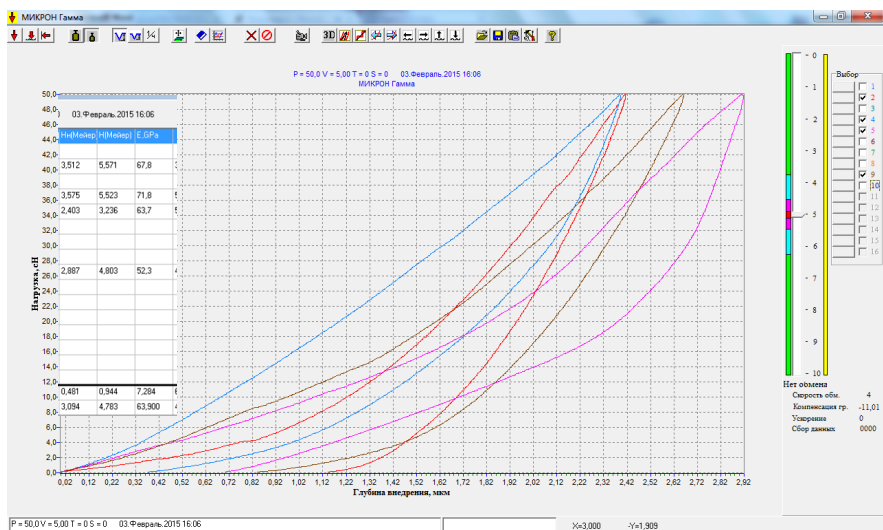


Рис. 4.17. Мікроклін граніту при частоті навантажень кумулятивним вибуховим ядром 24 виб/хв

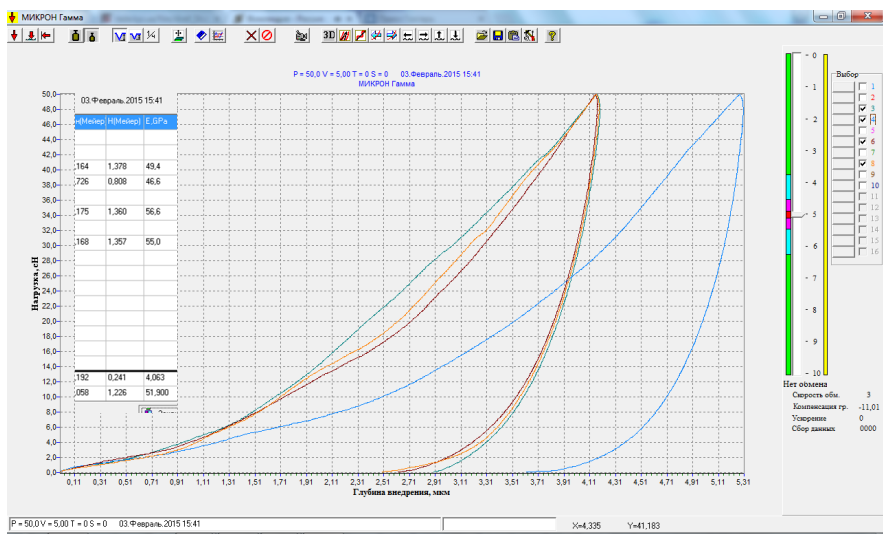


Рис. 4.18. Амфібол граніту до навантажень кумулятивним вибуховим ядром

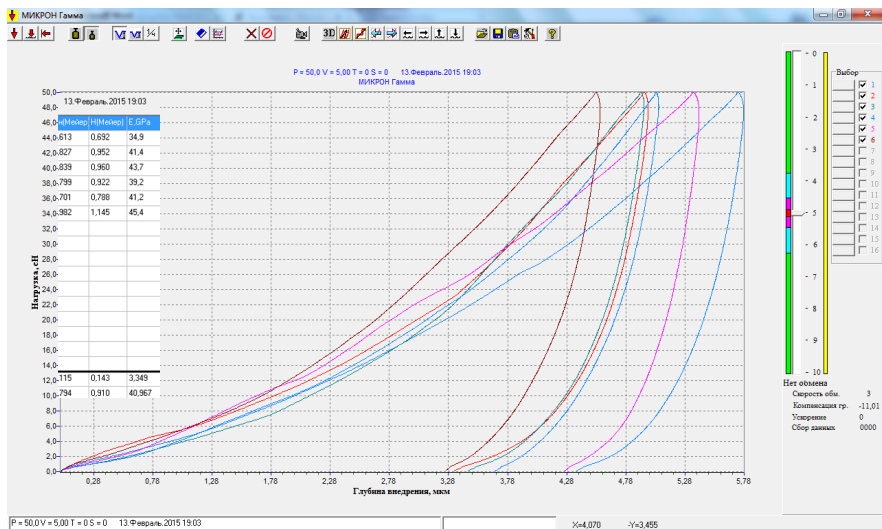


Рис. 4.19. Амфибол граніту при частоті навантажень кумулятивним вибуховим ядром 4 виб/хв

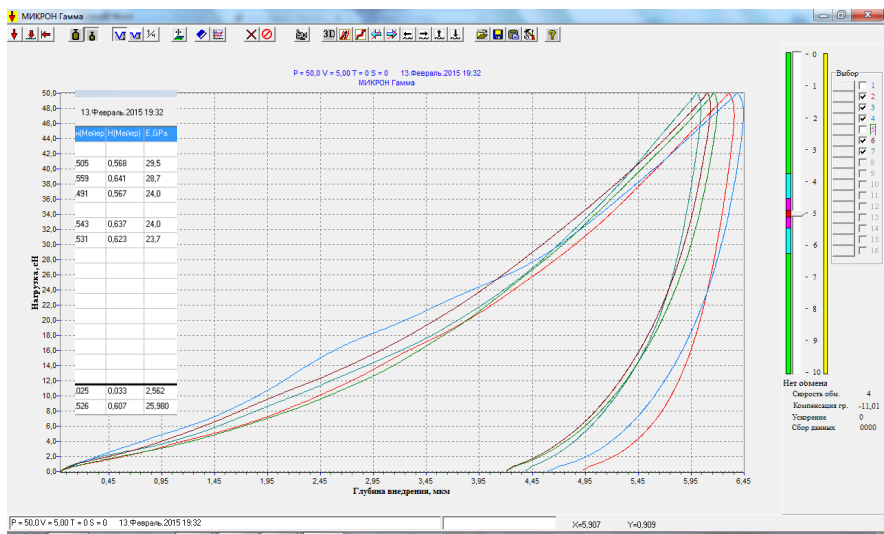


Рис. 4.20. Амфибол при частоті навантажень кумулятивним вибуховим ядром 12 виб/хв



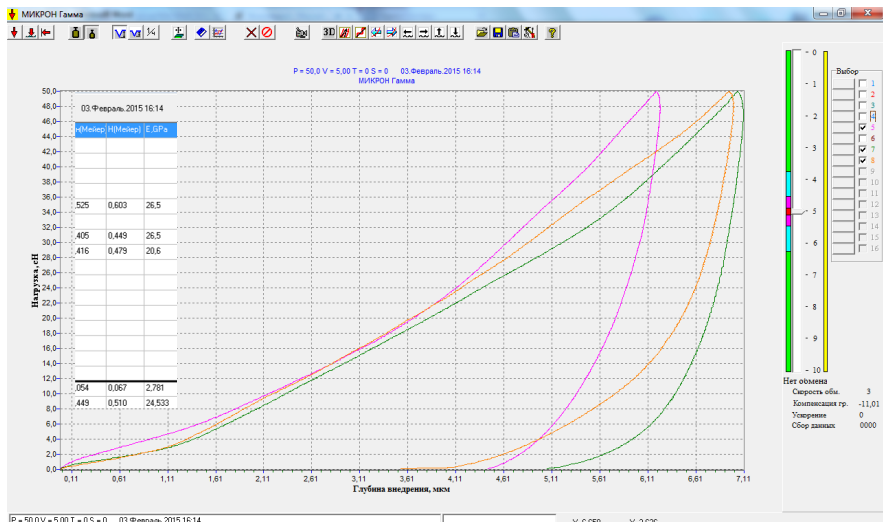


Рис. 4.21. Амфібол при частоті навантажень кумулятивним вибуховим ядром 24 виб/хв

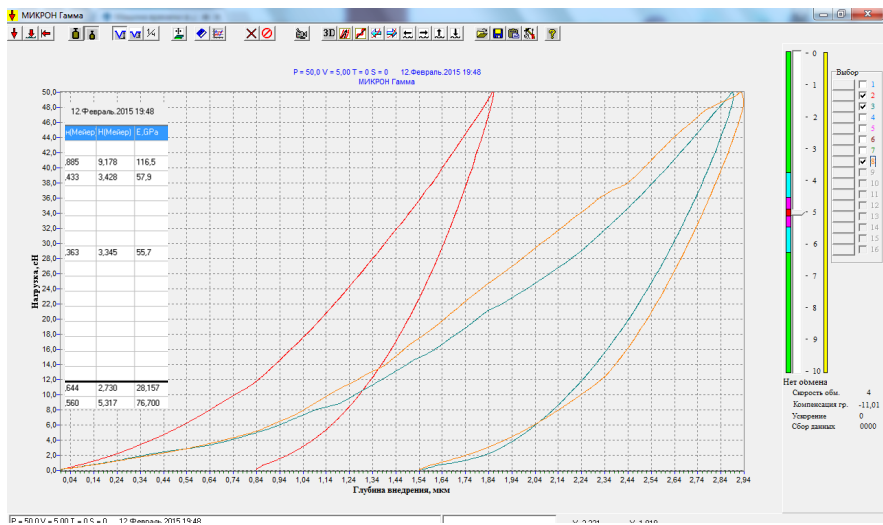


Рис. 4.22. Пісковик до навантажень кумулятивним вибуховим ядром

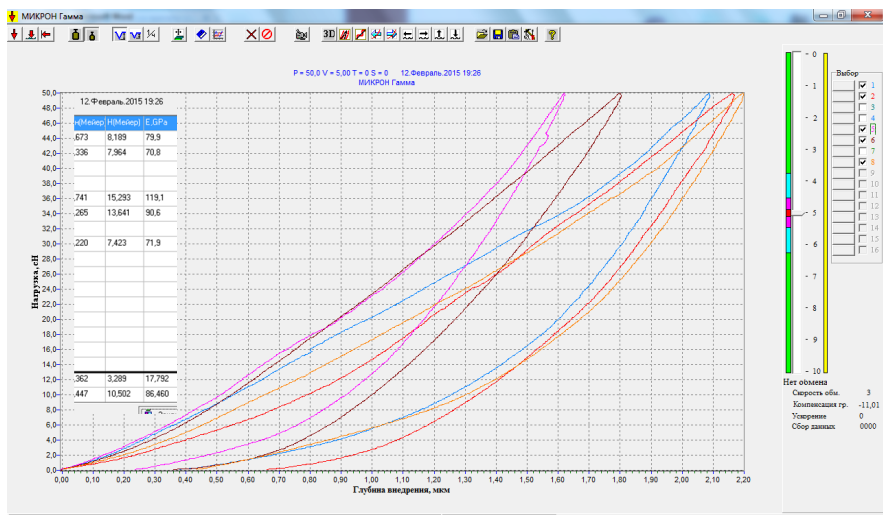


Рис. 4.23. Пісковик при частоті навантажень кумулятивним вибуховим ядром 4 виб/хв

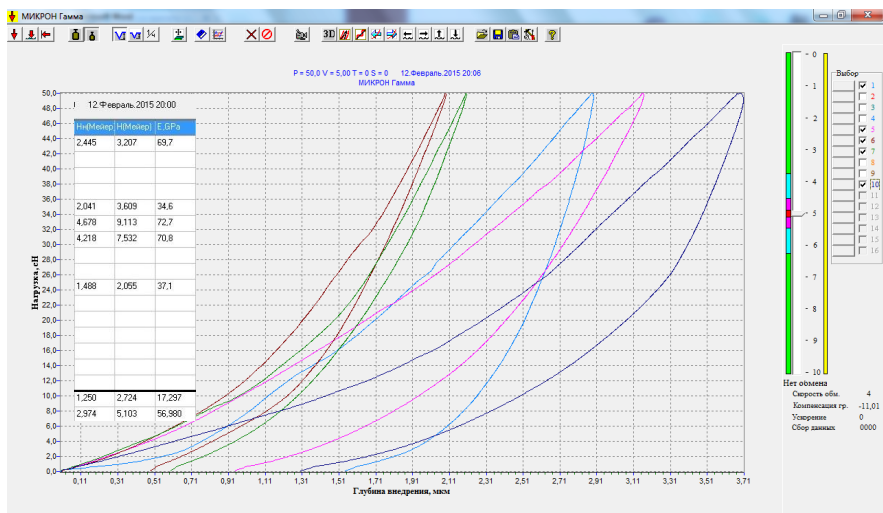


Рис. 4.24. Пісковик при частоті навантажень кумулятивним вибуховим ядром 12 виб/хв

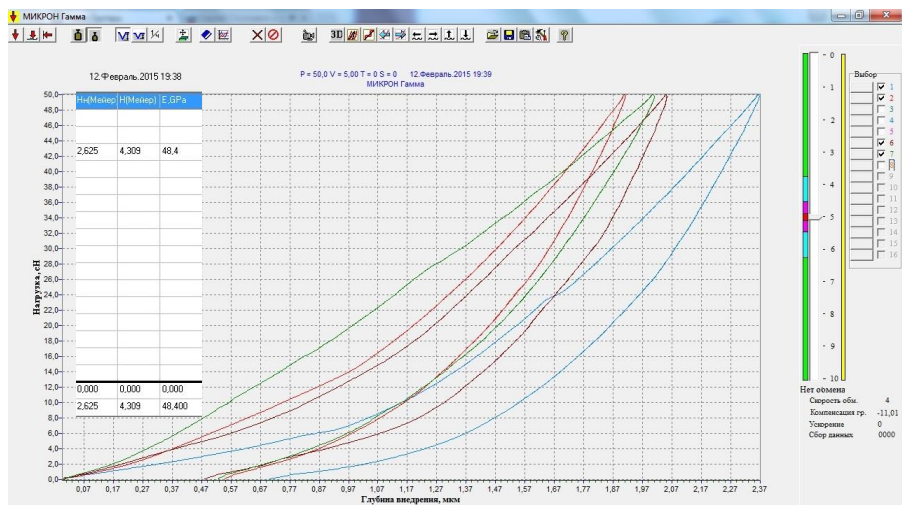


Рис. 4.25. Пісок при частоті навантажень кумулятивним вибуховим ядром 24 виб/хв

Прилад «Мікрон-гамма» оснащено електронним мікроскопом з кратністю  $\times 400$  для фіксації поверхні зразків ГП до та після навантажень КВЯ, рис. 4.26, 4.27, 4.28.

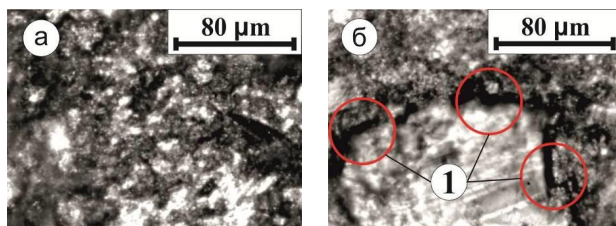


Рис. 4.26. Поверхня зразків габро: а - до навантажень кумулятивним вибуховим ядром; б – після навантажень кумулятивним вибуховим ядром – внесені технологічні мікротріщини 1. Кратність мікроскопа  $\times 400$

Поверхня габро до вибуху виглядає відносно гладкою з наявністю подряпин, рис. 4.26 а. Після навантажень КВЯ формується горбистий рельєф поверхні з формуванням мікротріщин 1, рис. 4.26 б. Криволінійність

мікротріщин габро пояснюється розривом зв'язків як в межах окремих мінералів так і між ними, рис. 4.26 б.

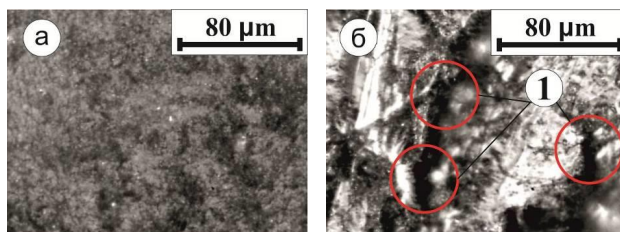


Рис. 4.27. Поверхня зразків граніту: а - до навантажень кумулятивним вибуховим ядром; б – після навантажень кумулятивним вибуховим ядром – внесені технологічні мікротріщини 1. Кратність мікроскопа x400

До навантажень КВЯ в мінералах граніту спостерігається оптична неоднорідність, рис. 4.27 а, що зникає після експерименту. Це пов'язано з наявністю дефектів в межах кристалічних решіток мінералів [137]. Внаслідок навантажень КВЯ дефекти зникають за рахунок пластичної деформації, що переходить в крихку з появою мікротріщин 1, рис. 4.27 б. Згідно з дослідями [137], зі збільшенням тиску на мінерали зростає коефіцієнт Пуассона, а отже і їх пластичність. З подальшим зростанням тиску коефіцієнт Пуассона знижується, а пластичні деформації переходять в крихкі. Цим пояснюється поява тріщин в зразках ГП, рис. 4.26 б, 4.27 б, 4.28 б.

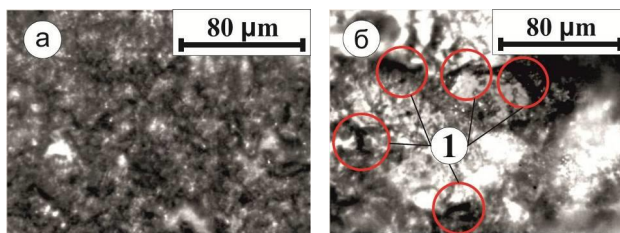


Рис. 4.28. Поверхня зразків пісковика: а - до вибухових навантажень кумулятивним вибуховим ядром; б – після навантажень кумулятивним

вибуховим ядром – внесені технологічні мікротріщини 1. Кратність мікроскопа  $\times 400$

Рис. 4.28 а підтверджує наявність природних мікродефектів в зразках пісковика до навантажень КВЯ. Після експериментів поверхня пісковика частково згладжується внаслідок ущільнення глинистого середовища, та появи мережі технологічних мікротріщин 1, рис. 4.28 б.

За результатами вимірювань побудовані залежності модуля пружності I роду від частоти навантажень вибою КВЯ, рис. 4.29.

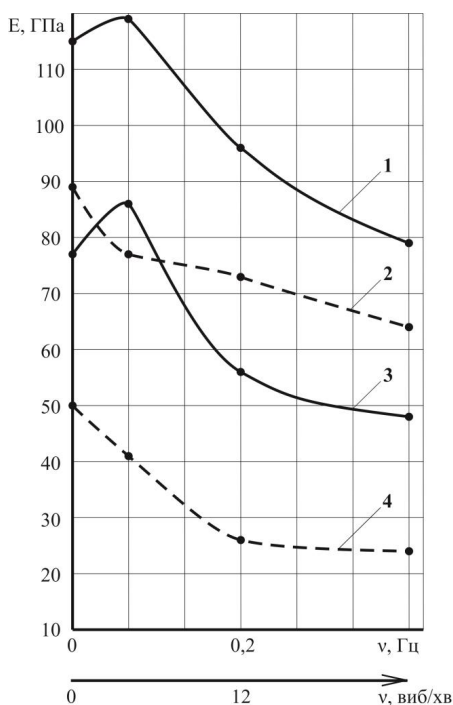


Рис. 4.29. Залежність модуля пружності I роду від частоти навантажень вибою кумулятивним вибуховим ядром для гірських порід суцільні, для мінералів - пунктирні: 1 – габро; 2 – мікроклін граніту; 3 – пісковик; 4 – амфібол граніту

Перші ділянки (частота навантажень від 0 до 4 виб/хв) для габро та пісковика відзначаються зростанням модуля пружності I роду внаслідок ущільнення пластичних мінералів та закриттям мікротріщин [137]. Це підтверджує в складі габро наявність 65 % пластичного лабрадора з коефіцієнтом Пуассона 0,30 в. о. [138]. Структура пісковика містить глинисте середовище з коефіцієнтом Пуассона 0,30...0,40 в.о. згідно зі СНІП IV-2-82. Ущільнення ГП призводить до збільшення їх теплопровідності [117] та поглиблює область пластичної деформації. Тому перші ділянки габро та пісковика (частота навантажень від 0 до 4 виб/хв) мають тангенс кута зростання рівний відповідно  $\text{tg}(21^\circ) = 0,38$  та  $\text{tg}(41^\circ) = 0,86$ .

Близька до епіцентру вибуху поверхня ГП не встигає пластично деформуватись під дією швидкості продуктів детонації до 5 км/с [67]. Частково або повністю відколюються мінерали ГП, формуючи впадини, між якими розвиваються мікротріщини. Зростає коефіцієнт комплексної тріщинуватості, що видно на зображеннях мікроскопічної зйомки, рис. 4.26. Тому модуль пружності I роду для габро та пісковика на другій ділянці (частота навантажень від 4 до 12 виб/хв) знижується з тангенсом кута падіння  $\text{tg}(49^\circ) = 1,15$  та  $\text{tg}(57^\circ) = 1,54$  відповідно.

На третій ділянці (частота навантажень від 12 до 24 виб/хв) інтенсивність падіння модуля пружності I роду для пісковика зменшується до тангенсу кута  $\text{tg}(15^\circ) = 0,26$ . Це пов'язано зі спікливістю, ущільненого глинистого середовища під дією температури продуктів детонації понад 3000 К. На третій ділянці для габро (частота навантажень від 12 до 24 виб/хв) тангенс кута падіння також зменшився до  $\text{tg}(29^\circ) = 0,55$  внаслідок пластичного ущільнення плагіоклазу.

Розміри зерен зразків граніту рівні 2...5 мм, тому вимірювання модуля пружності I роду проведено в основних мінералах: мікроклін - 40 %; амфібол – 30 %. Перші ділянки для мінералів (частота навантажень від 0 до 4 виб/хв) відображають крихке руйнування внаслідок близькості до епіцентру вибуху з тангенсом кута падіння  $\text{tg}(52^\circ) = 1,28$  та  $\text{tg}(38^\circ) = 0,78$ . Стрічкоподібні

кристали амфіболу, що зв'язані між собою катіонами [137] відколюються під дією навантажень КВЯ. Тому крихке руйнування першої ділянки для амфіболу продовжується до 12 виб/хв. Так формуються прямолінійні тріщини, рис. 4.27б.

При збільшенні частоти навантажень вибою КВЯ підповерхневий шар ущільнюється, що призводить до зростання його теплопровідності [117]. Тому на другій ділянці (частота навантажень від 4 до 12 виб/хв) проявляються пластичні властивості як мікрокліну так і амфіболу, а тангенс кута падіння зменшується до  $\text{tg}(14^\circ) = 0,25$  та  $\text{tg}(4^\circ) = 0,07$  відповідно. Адекватність підтверджується дослідженнями [118], щільність амфіболу зростає з навантаженням, прикладеним перпендикулярно до кристалів амфіболу. Коефіцієнт Пуассона спочатку досягає мінімальних значень, а потім зростає зі зростанням температури. Оскільки вміст мікрокліну в граніті є переважаючим (40 %) вирішено, що його властивості відображають властивості зразків граніту в цілому.

В лабораторії нанотехнологій проведено вимірювання мікротопографії поверхні зразків до та після навантажень КВЯ.

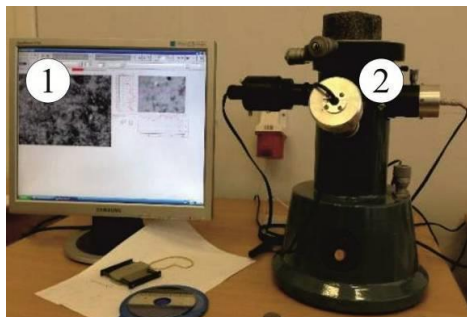


Рис. 4.30. Пристрій для побудови мікротопографії поверхні: 1 – електронно-обчислювальна машина з програмним забезпеченням «Мікрон-альфа»; 2 - нанопрофілограф «Мікрон-альфа»

Зразки габро до навантажень КВЯ мають нерівність поверхні з наявністю кратерів рис. 4.31 а.

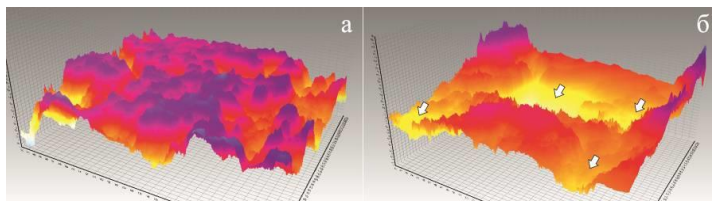


Рис. 4.31. Мікротопографія поверхні габро: а – до навантаження кумулятивним вибуховим ядром; б – після навантаження кумулятивним вибуховим ядром

Кількість кратерів становить 5, що займають 28 % від досліджуваної площі  $3 \cdot 10^4$  мкм<sup>2</sup> глибиною 3...9 мкм, рис. 4.31 а. Це сліди мікроподряпин поверхні, що видні на мікроскопічній зйомці, рис. 4.26 а. Під час навантаження КВЯ вибиває мінерали, розповсюджуючи мікротріщини. Так три кратери на поверхні габро поглибились до 6...14 мкм та розширились до 45 % від досліджуваної площі  $3 \cdot 10^4$  мкм<sup>2</sup>, рис. 4.31 б.

Поверхня зразків граніту до навантажень КВЯ відносно гладка з наявністю кратерів у кількості 8, рис. 4.32 а. Це підтверджується мікрозйомкою, рис. 4.27 а.

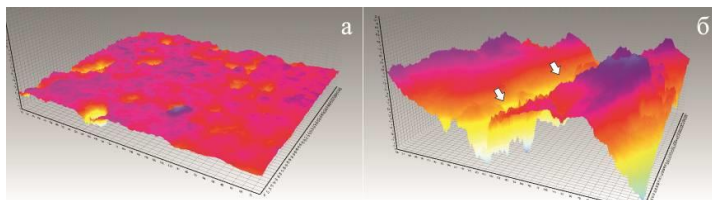


Рис. 4.32. Мікротопографія поверхні граніта: а – до навантаження кумулятивним вибуховим ядром; б – після навантаження кумулятивним вибуховим ядром



Кратери займають 24 % від досліджуваної площі  $3 \cdot 10^4$  мкм<sup>2</sup>, глибина яких становить 1...3 мкм. Характерне утворення ущелини на поверхні граніту, що перетинає досліджувану площу та має глибину 3...14 мкм. Поява ущелини пояснюється розривом зв'язків між стрічкоподібними кристалами рогової обманки, рис. 4.32 б. Додатково утворився один кратер глибиною 12 мкм, що разом з ущелиною займають площу 40 % від досліджуваної.

Поверхня зразків пісковика до навантажень КВЯ має сім кратерів, глибиною 2...8 мкм, рис. 4.33 а. Це пов'язано з відколом мілкозернистого кварцу під час шліфування. Кратери займають 53 % від досліджуваної площі  $3 \cdot 10^4$  мкм<sup>2</sup>. Під дією КВЯ піщинки кварцу відколюються, розширюючи кратери що займають площу 65 %. Глибина зросла до 5...18 мкм, що підтверджує рис. 4.33 б.

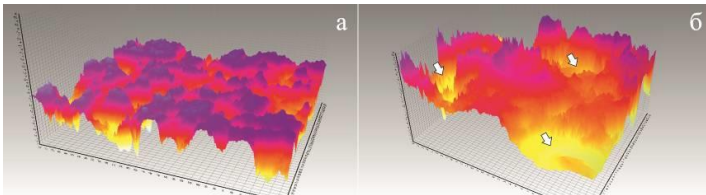


Рис. 4.33. Мікротопографія поверхні пісковика: а – до навантаження кумулятивним вибуховим ядром; б – після навантаження кумулятивним вибуховим ядром

Для визначення глибини проникнення внесеної технологічної тріщинуватості внаслідок навантажень КВЯ проведено рентгенографічну зйомку зразків ГП, рис. 4.34, 4.35, 4.36 а, б. Зображення після навантажень КВЯ для зразків габро та граніту відрізняються появою області затемнення 1, рис. 4.34, 4.35, б. Відомо [139], що чорний колір на рентгенівських знімках характеризує наявність повітря, що насичує дефекти в структурі ГП. Тому область 1 відображає внесену технологічну тріщинуватість, наповнену

повітрям. Глибина області внесеної технологічної тріщинуватості 1 для габро складала 3...5 мм, ширина - 23 мм, рис. 4.34 б.

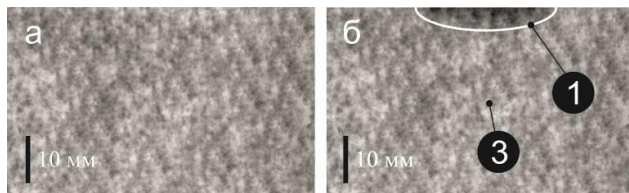


Рис. 4.34. Рентгенографічне зображення зразка габро: а – до навантажень кумулятивним вибуховим ядром; б – після навантажень кумулятивним вибуховим ядром – область внесеної технологічної тріщинуватості 1, область природної тріщинуватості 3

Глибина внесеної технологічної тріщинуватості для граніту складає 5...10 мм, рис. 4.35 б.

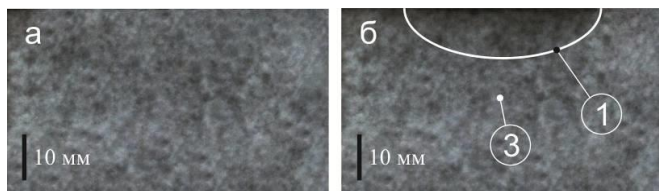


Рис. 4.35. Рентгенографічне зображення зразка граніту: а – до навантажень кумулятивним вибуховим ядром; б – після навантажень кумулятивним вибуховим ядром – область внесеної технологічної тріщинуватості 1, область природної тріщинуватості 3

Рентгенографічні зображення пісковика свідчать про його ущільнення під дією навантажень, на що вказує так звана «біла тінь» 1, рис. 4.36 б. Ущільнення пояснюється наявністю пластичного глинисто-слюдистого цементу у складі пісковика та природної тріщинуватості близько 3,0 %. Верхня частина області ущільнення 2, поглиблюючись з 1 до 3 мм темніє, що відображає появу

внесеної технологічної тріщинуватості 1 глибиною до 3 мм, рис. 4.36 б. Глибина внесеної тріщинуватості для пісковика не перевищує 5мм.

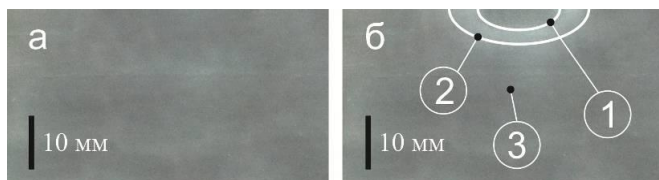


Рис. 4.36. Рентгенографічне зображення зразка пісковика: а – до навантажень кумулятивним вибуховим ядром; б – після навантажень кумулятивним вибуховим ядром – область внесеної технологічної тріщинуватості 1, область ущільнення «біла тінь» 2, область природної тріщинуватості 3

Для проведення капілярної дефектоскопії [91] підготовлено зразок граніту, поверхня якого відшліфована після впливу КВЯ. Дефектоскопія спочатку проведена на поверхні граніту, рис. 4.37 а. Потім зразок розрізано навпіл по лінії епіцентру вибуху для дослідження поперечних перерізів граніту щодо глибини проникнення тріщин, рис. 4.37 б.

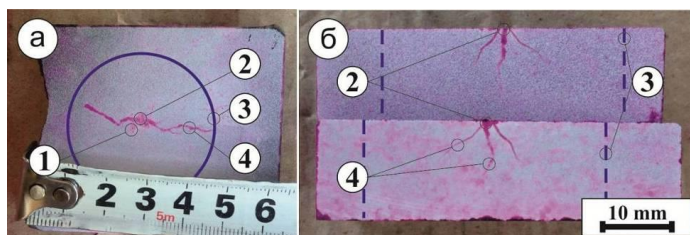


Рис. 4.37. Результати капілярної дефектоскопії зразка граніту після навантаження кумулятивним вибуховим ядром: а – поверхня зразка граніту; б – поперечні розрізи зразка граніту в епіцентрі вибуху; 1 – зколи; 2 - епіцентр вибуху; 3 – контур ріжучого інструменту комбінованої дії; 4 – мікротріщини

Для виявлення інших дефектів та тріщин, не зафіксованих капілярною дефектоскопією, проведено мікроскопічну зйомку поверхні зразка в межах впливу ріжучого інструмента комбінованої дії, рис. 4.38. Зйомка проведена в чотирьох точках зразка: 1 – в епіцентрі вибуху; 2 – в 5 мм від епіцентру вибуху; 3 – в 10 мм від епіцентру вибуху; 4 – в 20 мм від епіцентру вибуху. Результати досліджень підтверджують появу тріщин по периметру області руйнування ріжучого інструмента комбінованої дії діаметром 36 мм, рис. 4.38 а, б, в, г. Встановлені тріщини мають ширину розкриття 1,1...4,7 мкм тому не виявлені капілярною дефектоскопією.

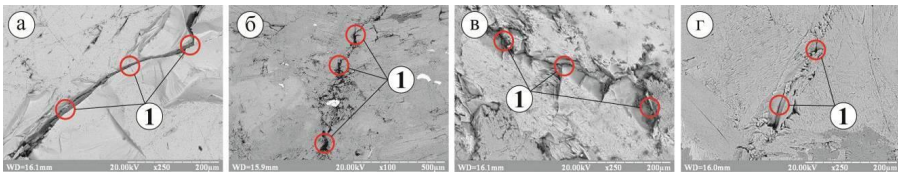


Рис. 4.38. Мікроскопічна зйомка граніту після навантажень кумулятивним вибуховим ядром: а – в епіцентрі вибуху; б – 5 мм від епіцентру вибуху; в – 10 мм від епіцентру вибуху; г – 20 мм від епіцентру вибуху (1 – мікротріщини)

Згідно з науковою літературою температура КВЯ в 5...10 разів нижча температури вибуху та не перевищує 1000 К [67]. Тому температура КВЯ не є основним руйнівним чинником. Це підтверджено аналітичним моделюванням (розділ 3) та експериментально, рис. 4.38. Отже важливо знати температуру вибуху, що визначає руйнівні чинники КВЯ: тиск та швидкість навантаження. Практичне визначення температури вибуху ускладнюється його абсолютним значенням (5000 К) та короткочасністю процесу. Існуючі прилади нездатні до вимірювання температури вибуху у зв'язку з тепловою інерцією. Тому вирішено застосувати розрахунковий метод визначення даної величини, що наведено далі.

Кисневий баланс суміші  $KClO_4$  (компонент № 1) та  $Mg$  (компонент № 2) рівний [140]:

$$KB = \frac{\left[ d_1 - \left( 2 \cdot a_1 + \frac{b_1}{2} \right) \right] \cdot 16}{M_1} \cdot P_1 \cdot 100 + \frac{\left[ d_2 - \left( 2 \cdot a_2 + \frac{b_2}{2} \right) \right] \cdot 16}{M_2} \cdot P_2 \cdot 100 = \quad (4.6)$$

$$= \frac{\left[ 4 - \left( 2 \cdot 0 + \frac{1}{2} \right) \right] \cdot 16}{138,5} \cdot 0,6 \cdot 100 + \frac{\left[ 0 - \left( 2 \cdot 1 + \frac{0}{2} \right) \right] \cdot 16}{24,3} \cdot 0,4 \cdot 100 = -28,4 \%,$$

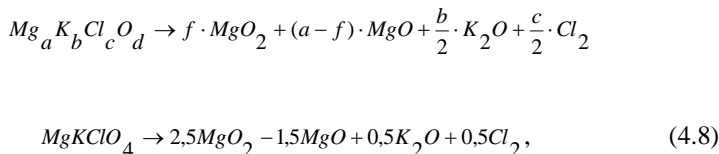
де  $d_1 = 4$  – число атомів кисню в  $KClO_4$ , атомів;  $a_1 = 0$  – число атомів магнію в  $KClO_4$ , атомів;  $b_1 = 1$  – число атомів калію в  $KClO_4$ , атомів;  $M_1 = 138,5$  – молярна маса перхлорату калію, [141], г/моль;  $P_1 = 0,6$  – частка  $KClO_4$  в суміші, згідно з дослідженнями, в.о.;  $d_2 = 0$  – число атомів кисню в  $Mg$ , атомів;  $a_2 = 1$  – число атомів магнію в  $Mg$ , атомів;  $b_2 = 0$  – число атомів калію в  $Mg$ , атомів;  $M_2 = 24,3$  – молярна маса  $Mg$ , [141], г/моль;  $P_2 = 0,4$  – частка  $Mg$  в суміші, згідно з дослідженнями, в.о.

Оскільки кисневий баланс від’ємний, обрана суміш віднесена до III групи [140]. Відповідно хімічна формула обраної суміші приймає вигляд  $Mg_a K_b Cl_c O_d$ . Тоді рівняння хімічного перетворення визначається за величиною  $f$  [140]:

$$f = d - \left( a + \frac{b}{2} \right) = 4 - \left( 1 + \frac{1}{2} \right) = 2,5 \text{ в.о.}, \quad (4.7)$$

де  $d = 4$  – число атомів кисню в суміші, атомів;  $a = 1$  – число атомів  $Mg$  в суміші, атомів;  $b = 1$  – число атомів  $K$  в суміші, атомів.

Для  $f > 2,5$  хімічна реакція вибуху має вигляд:



Максимальна температура вибуху суміші  $KClO_4$  та  $Mg$ :

$$T = \frac{-\sum n \cdot a + \sqrt{(\sum n \cdot a)^2 + 4 \cdot \sum n \cdot b \cdot Q_v}}{2 \cdot \sum n \cdot b} =$$

$$= \frac{-70,22 + \sqrt{(70,22)^2 + 4 \cdot 0,0037 \cdot 285000}}{2 \cdot 0,0037} = 3436 \text{ K}, \quad (4.9)$$

де  $\sum n \cdot a$  та  $\sum n \cdot b$  – сума добутків відповідно числа молів та емпіричних коефіцієнтів продуктів детонації за Г. Кастом [140], за рівняннями 4.10, 4.11;  $Q_v$  – теплота вибуху, за рівнянням 4.12, кДж.

$$\sum n \cdot a = n_{MgO_2} \cdot a_{MgO_2} + n_{MgO} \cdot a_{MgO} + n_{K_2O} \cdot a_{K_2O} + n_{Cl_2} \cdot a_{Cl_2} =$$

$$= 2,5 \cdot 30,096 - 1,5 \cdot 20,06 + 0,5 \cdot 30,096 + 0,5 \cdot 20,06 = 70,22 \frac{\text{Дж}}{\text{K}}, \quad (4.10)$$

де  $n_{MgO_2} = 2,5$  – число молів  $MgO_2$ , з рівняння 4.8, моль;  $a_{MgO_2} = 30,096$  – температурний коефіцієнт за Г. Кастом для триатомних газів, [140], Дж;  $n_{MgO} = -1,5$  – число молів  $MgO$ , з рівняння 4.8, моль;  $a_{MgO} = 20,06$  – температурний коефіцієнт за Г. Кастом для двоатомних газів, [140], Дж;  $n_{K_2O} = 0,5$  – число молів  $K_2O$ , з рівняння 4.8, моль;  $a_{K_2O} = 30,096$  – температурний коефіцієнт за Г.

Кастом для триатомних газів, [140], Дж;  $n_{Cl_2} = 0,5$  – число молів  $Cl_2$ , з рівняння 4.8, моль;  $a_{Cl_2} = 20,06$  – температурний коефіцієнт за Г. Кастом для двоатомних газів, [140], Дж.

$$\begin{aligned} \sum n \cdot b &= n_{MgO_2} \cdot b_{MgO_2} + n_{MgO} \cdot b_{MgO} + n_{K_2O} \cdot b_{K_2O} + n_{Cl_2} \cdot b_{Cl_2} = \\ &= 2,5 \cdot 0,001881 - 1,5 \cdot 0,001884 + 0,5 \cdot 0,001881 + 0,5 \cdot 0,001884 = 0,0037 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}, \quad (4.11) \end{aligned}$$

де  $b_{MgO_2} = 0,001881$  – температурний коефіцієнт за Г. Кастом для триатомних газів, [140], Дж;  $b_{MgO} = 0,001884$  – температурний коефіцієнт за Г. Кастом для двоатомних газів, [140], Дж;  $b_{K_2O} = 0,001881$  – температурний коефіцієнт за Г. Кастом для триатомних газів, [140], Дж;  $b_{Cl_2} = 0,001884$  – температурний коефіцієнт за Г. Кастом для двоатомних газів, [140], Дж.

Теплота вибуху при постійному об'ємі:

$$\begin{aligned} Q_v &= (n_{MgO_2} \cdot Q_{MgO_2} + n_{MgO} \cdot Q_{MgO} + n_{K_2O} \cdot Q_{K_2O} - n_{KClO_4} \cdot Q_{KClO_4}) + +2,39 \cdot (n_{MgO_2} + n_{MgO} + n_{K_2O}) = \\ &= (2,5 \cdot 570,14 - 1,5 \cdot 601,8 + 0,5 \cdot 363,2 - 1 \cdot 427,2) + +2,39 \cdot (2,5 + 1,5 + 0,5) = 285 \text{ кДж} \quad (4.12) \end{aligned}$$

де  $Q_{MgO_2} = 570,14$  – теплота утворення  $MgO_2$ , розраховано за формулою 4.14, кДж;  $Q_{MgO} = 601,8$  – теплота утворення  $MgO$ , [142], кДж;  $Q_{K_2O} = 363,2$  – теплота утворення  $K_2O$ , [142], кДж;  $n_{KClO_4} = 1$  – число молів  $KClO_4$ , з рівняння 4.8, кДж;  $Q_{KClO_4} = 427,2$  – теплота утворення  $KClO_4$ , [142], кДж.

Оскільки дані, щодо теплоти утворення  $MgO_2$  відсутні, її розраховано за законом Г.І. Гесса [140] з рівняння [143]

$$MgCO_3 + O \rightarrow MgO_2 + CO_2 (\Delta H = -117 \text{ кДж/моль}).$$

За законом Г.І. Гесса [140]:

$$\Delta H = (1 \cdot \Delta H_{MgO_2} + 1 \cdot \Delta H_{CO_2}) - (1 \cdot \Delta H_{MgCO_3} + 1 \cdot \Delta H_O). \quad (4.13)$$

Звідси теплота утворення  $MgO_2$ :

$$\begin{aligned} \Delta H_{MgO_2} &= (1 \cdot \Delta H_{CO_2} - 1 \cdot \Delta H_{MgCO_3} - 1 \cdot \Delta H_O - \Delta H = \\ &= (1 \cdot (-393,51) - 1 \cdot (-1095,85) - 1 \cdot 249,2 - (-117)) = 570,14 \text{ кДж/моль}, \end{aligned} \quad (4.14)$$

де  $\Delta H_{CO_2} = -393,51$  - теплота утворення  $CO_2$ , [142], кДж/моль;  $\Delta H_{MgCO_3} = -1095,85$  - теплота утворення  $MgCO_3$ , [142], кДж/моль;  $\Delta H_O = 249,2$  - теплота утворення  $O$ , [142], кДж/моль.

Кисневий баланс суміші  $KClO_4$  (компонент № 1) та  $Al$  (компонент № 2) рівний [140]:

$$\begin{aligned} KB &= \frac{\left[ d_1 - \left( 2 \cdot a_1 + \frac{b_1}{2} \right) \right] \cdot 16}{M_1} \cdot P_1 \cdot 100 + \frac{\left[ d_2 - \left( 2 \cdot a_2 + \frac{b_2}{2} \right) \right] \cdot 16}{M_2} \cdot P_2 \cdot 100 = \\ &= \frac{\left[ 4 - \left( 2 \cdot 0 + \frac{1}{2} \right) \right] \cdot 16}{138,5} \cdot 0,6 \cdot 100 + \frac{\left[ 0 - \left( 2 \cdot 1 + \frac{0}{2} \right) \right] \cdot 16}{26,98} \cdot 0,4 \cdot 100 = 23,18 \%, \end{aligned} \quad (4.15)$$

де  $d_1 = 4$  – число атомів кисню в  $KClO_4$ , атомів;  $a_1 = 0$  – число атомів алюмінію в  $KClO_4$ , атомів;  $b_1 = 1$  – число атомів калію в  $KClO_4$ , атомів;  $M_1 = 138,5$  – молярна маса перхлорату калію, [141], г/моль;  $P_1 = 0,6$  – частка  $KClO_4$  в суміші, згідно з дослідженнями, в.о.;  $d_2 = 0$  – число атомів кисню в  $Al$ , атомів;  $a_2 = 1$  –



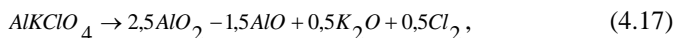
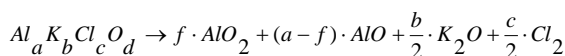
число атомів алюмінію в  $Al$ , атомів;  $b_2 = 0$  – число атомів калію в  $Al$ , атомів;  $M_2 = 26,98$  – молярна маса  $Al$ , [141], г/моль;  $P_2 = 0,4$  – частка  $Al$  в суміші, згідно з дослідженнями, в.о.

Оскільки кисневий баланс від’ємний, обрана суміш віднесена до III групи [140]. Відповідно хімічна формула обраної суміші приймає вигляд  $Al_a K_b Cl_c O_d$ . Тоді рівняння хімічного перетворення визначається за величиною  $f$  [140]:

$$f = d - \left(a + \frac{b}{2}\right) = 4 - \left(1 + \frac{1}{2}\right) = 2,5 \text{ в.о.}, \quad (4.16)$$

де  $d = 4$  – число атомів кисню в суміші, атомів;  $a = 1$  – число атомів  $Al$  в суміші, атомів;  $b = 1$  – число атомів  $K$  в суміші, атомів.

Для  $f > 2,5$  хімічна реакція вибуху має вигляд:



Максимальна температура вибуху суміші  $KClO_4$  та  $Al$ :

$$T = \frac{-\sum n \cdot a + \sqrt{(\sum n \cdot a)^2 + 4 \cdot \sum n \cdot b \cdot Q_v}}{2 \cdot \sum n \cdot b} =$$

$$= \frac{-70,22 + \sqrt{(70,22)^2 + 4 \cdot 0,0037 \cdot 220000}}{2 \cdot 0,0037} = 2741 \text{ K}, \quad (4.18)$$

де  $\sum n \cdot a$  та  $\sum n \cdot b$  – сума добутків відповідно числа молів та емпіричних коефіцієнтів продуктів детонації за Г. Кастом [140], за формулою 4.19, 4.20;  $Q_v = 220$  – теплота вибуху, за формулою 4.21, кДж.

Сума добутків відповідно числа молів:

$$\begin{aligned}\sum n \cdot a &= n_{AlO_2} \cdot a_{AlO_2} + n_{AlO} \cdot a_{AlO} + n_{K_2O} \cdot a_{K_2O} + n_{Cl_2} \cdot a_{Cl_2} = \\ &= 2,5 \cdot 30,096 - 1,5 \cdot 20,06 + 0,5 \cdot 30,096 + 0,5 \cdot 20,06 = 70,22 \frac{\text{Дж}}{\text{К}},\end{aligned}\quad (4.19)$$

де  $n_{AlO_2} = 2,5$  – число молів  $AlO_2$ , з рівняння 4.17, моль;  $a_{AlO_2} = 30,096$  – температурний коефіцієнт за Г. Кастом для триатомних газів, [140], Дж;  $n_{AlO} = 1,5$  – число молів  $AlO$ , з рівняння 4.17, моль;  $a_{AlO} = 20,06$  – температурний коефіцієнт за Г. Кастом для двоатомних газів, [140], Дж;  $n_{K_2O} = 0,5$  – число молів  $K_2O$ , з рівняння 4.17, моль;  $a_{K_2O} = 30,096$  – температурний коефіцієнт за Г. Кастом для триатомних газів, [140], Дж;  $n_{Cl_2} = 0,5$  – число молів  $Cl_2$ , з рівняння 4.17, моль;  $a_{Cl_2} = 20,06$  – температурний коефіцієнт за Г. Кастом для двоатомних газів, [140], Дж.

$$\begin{aligned}\sum n \cdot b &= n_{Al_2O_3} \cdot b_{Al_2O_3} + n_{AlO} \cdot b_{AlO} + n_{K_2O} \cdot b_{K_2O} + n_{Cl_2} \cdot b_{Cl_2} = \\ &= 2,5 \cdot 0,001881 - 1,5 \cdot 0,001884 + 0,5 \cdot 0,001881 + 0,5 \cdot 0,001884 = 0,0037 \frac{\text{Дж}}{\text{К}},\end{aligned}\quad (4.20)$$

де  $b_{Al_2O_3} = 0,001881$  – температурний коефіцієнт за Г. Кастом для триатомних газів, [140], Дж;  $b_{AlO} = 0,001884$  – температурний коефіцієнт за Г. Кастом для двоатомних газів, [140], Дж;  $b_{K_2O} = 0,001881$  – температурний коефіцієнт за Г. Кастом для триатомних газів, [140], Дж;  $b_{Cl_2} = 0,001884$  – температурний коефіцієнт за Г. Кастом для двоатомних газів, [140], Дж.

Теплота вибуху при постійному об'ємі:

$$Q_v = (n_{AlO_2} \cdot Q_{AlO_2} + n_{AlO} \cdot Q_{AlO} + n_{K_2O} \cdot Q_{K_2O} - n_{KClO_4} \cdot Q_{KClO_4}) + 2,39 \cdot (n_{AlO_2} + n_{AlO} + n_{K_2O}) =$$

$$= (2,5 \cdot 222,08 - 1,5 \cdot 67 + 0,5 \cdot 363,2 - 1 \cdot 427,2) + 2,39 \cdot (2,5 + 1,5 + 0,5) = 220 \text{ кДж}, \quad (4.21)$$

де  $Q_{AlO_2} = 222,08$  – теплота утворення  $AlO_2$ , [142], кДж;  $Q_{AlO} = 67$  – теплота утворення  $AlO$ , [142], кДж;  $Q_{K_2O} = 363,2$  – теплота утворення  $K_2O$ , [142], кДж;  $n_{KClO_4} = 1$  – число молів  $KClO_4$ , з рівняння 4.17, кДж;  $Q_{KClO_4} = 427,2$  – теплота утворення  $KClO_4$ , [142], кДж.

Встановлено, що температура вибуху суміші  $Mg + KClO_4$  склала 3436 К, а для суміші  $Al + KClO_4$  - 2741 К. Відомо, що температура вибуху більшості ВР знаходиться в діапазоні 2873...4473 К [127]. Тому результати вимірювання можна вважати адекватними відомим дослідженням температури вибуху [67].

Перед експериментом зі встановлення енергоємності руйнування ГП під час вибухо-механічних навантажень перевірено рекомендовану швидкість та витрату повітря через продувний канал, рис. 4.39.



Рис. 4.39. Вимірювання швидкості та витрати повітря через продувний канал ріжучого інструменту анемометром Testo 405-V1: а – вимірювання швидкості повітря; б – вимірювання витрат повітря через продувний канал

Вимірювання цих параметрів проведено анемометром Testo 405-V1, рис. 4.39, технічні характеристики якого наведено в розділі 2. З рисунку 4.39а швидкість повітря складає 8,67 м/с, що знаходиться в рекомендованих межах 8...16 м/с [93]. Витрата повітря на рисунку 4.39б рівна 1706 м<sup>3</sup>/год·10, що в перерахунку складає 2,84 м<sup>3</sup>/хв та відповідає рекомендованим 2...3 м<sup>3</sup>/хв [93].

#### 4.3 Обробка результатів та перевірка з математичною моделлю

Для перевірки адекватності математичної моделі виміряно питому енергоємність вибухо-механічного руйнування зразків ГП на експериментальному пристрої, рис. 4.5. Енергоємність визначалась за показниками аналізатора електромережі, ватметра та розмірів сформованого шпура. Глибина проникнення внесеної технологічної тріщинуватості склала 10 мм, що викликало руйнування. Руйнування ГП проведено у чотирьох режимах: механічний, вибухо-механічний з частотою навантажень КВЯ 0,2 Гц та 0,4 Гц. Режим вибухо-механічний проведено додатково для суміші Al + KClO<sub>4</sub>. (дивись розділ 2). Це дозволило визначити вплив температури вибуху на енергоємність руйнування ГП. Необхідна кількість вимірювань для кожного режиму рівна 4 при коефіцієнті Стюдента 2,80 в.о., та довірчій імовірності 95 %. Тому виготовлено по 20 зразків габро, граніту та пісковика. Проведено 60 вимірювань для розрахунку енергоємності вибухо-механічного руйнування ГП. За результатами апробації побудовані залежності енергоємності руйнування ГП від: частоти навантажень вибою КВЯ та температури вибуху, рис. 4.40 а, б.

Експериментальне зниження енергоємності руйнування від частоти навантажень вибою КВЯ, рис. 4.40 а, відбулось в межах для:

- габро з 279 до 254 кВт·год/м<sup>3</sup> або на 9 %;
- граніту з 240 до 209 кВт·год/м<sup>3</sup> або на 13 %;
- пісковика з 227 до 192 кВт·год/м<sup>3</sup> або на 15 %.

Залежності для габро 1 та граніту 2 мають спадаючий експоненціальний характер, рис. 4.40 а. Для пісковика залежність характеризується параболічним

падінням, що пояснюється його ущільненням за рахунок пластичного глинисто-слюдистого середовища та пористості близько 3,0 %. Ущільнення пісковика також підтверджено областю 2 на рентгенографічному зображенні, рис. 4.20 б. Максимальна розбіжність між теоретичними та експериментальними залежностями складає для габро та пісковика 8 %, для граніту 9 %. Мінімальна розбіжність рівна для габро 6 %, для граніту 4 %, для пісковика 4 %.

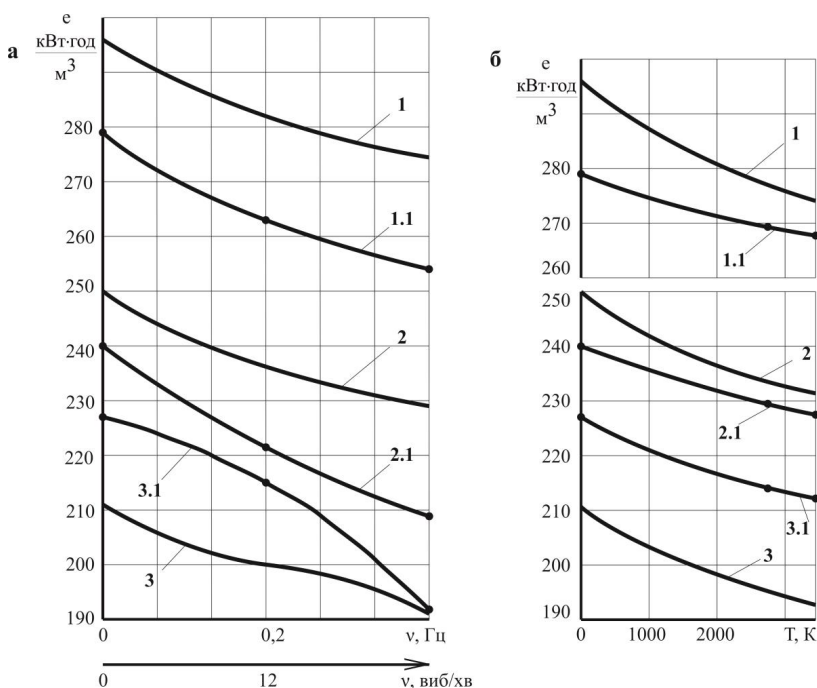


Рис. 4.40. Залежності енергоємності руйнування гірських порід вибухо-механічними навантаженнями від: а – частоти навантажень вибою кумулятивним вибуховим ядром; б – температури вибуху (1 – габро теоретичний; 1.1 – габро експериментальний; 2 – граніт теоретичний; 2.1 – граніт експериментальний; 3 – пісковик теоретичний; 3.1 – пісковик експериментальний)

Залежності енергоємності руйнування зразків ГП від температури вибуху мають експоненціальний характер, рис. 4.40 б. Зниження енергоємності зафіксовано для:

- габро на 4 % від 279 кВт·год/м<sup>3</sup>;
- граніту на 5 % від 240 кВт·год/м<sup>3</sup>;
- пісковика на 7 % від 227 кВт·год/м<sup>3</sup>.

Максимальна розбіжність між теоретичними та експериментальними залежностями склала для габро 6 %, для граніту 4 %, для пісковика 10 %. Мінімальна розбіжність рівна для габро 2 %, для граніту 1%, для пісковика 7 %.

Перевірка адекватності математичної моделі реальним процесам вибухо-механічного руйнування ГП проведена за критерієм Фішера, розділ 2. Для залежності енергоємності руйнування ГП від частоти навантажень вибою КВЯ розрахунковий критерій Фішера рівний 1,46 в.о. Згідно з [94] визначено табличне значення критерія Фішера, що рівне 2,46 в.о. при числі ступенів свободи дисперсій 6 та рівня значимості 0,05 в.о., розділ 2. Для залежності енергоємності руйнування ГП від температури вибуху критерій Фішера рівний 1,26 в. о. Згідно з [94] визначено табличне значення критерія Фішера, що рівне 2,57 в.о. при числі ступенів свободи дисперсій 5 та рівня значимості 0,05 в.о. Отримані розрахункові та табличні значення критерія Фішера відповідають умові  $F_{\text{роз}} < F_{\text{табл}}$ , а отже підтверджують адекватність математичної моделі.

Час на руйнування  $1 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup> зразків ГП знизився: з 6,5 хв до 5,9 хв, або на 9 % для габро; з 4,3 хв до 3,7 хв, або на 13 % для граніту; з 4,1 хв до 3,5 хв, або на 15 % для пісковика. Відповідно зросла швидкість руйнування зразків габро, граніту та пісковика на 9 % від 9,23 м/год, 13 % 13,95 м/год та на 14 % від 14,63 м/год.

## Висновки

1. Запропоновано інноваційний спосіб комбінованого руйнування ГП, захищений патентом 107732 UA, E21B 7/00 та конструкцію ріжучого інструмента вибухо-механічної дії для його реалізації.

2. Створено повнорозмірний експериментальний пристрій вибухо-механічного руйнування кумулятивним вибуховим ядром, якій дозволив отримати залежності енергоємності руйнування ГП від частоти навантажень вибою кумулятивним вибуховим ядром та температури вибуху.

3. Експериментально встановлено поліноміальне зниження:

- швидкості ультразвукових хвиль від частоти навантажень вибою

кумулятивним вибуховим ядром, а саме:

а) з 6711 м/с до 6538 м/с, тобто на 2,0 % для габро;

б) з 5369 м/с до 5204 м/с, тобто на 2,5 % для граніту;

в) з 4377 м/с до 4035 м/с, тобто на 8,0 % для пісковика;

- модуля пружності I роду від частоти навантажень вибою

кумулятивним вибуховим ядром, а саме:

а) з 115 ГПа до 79 ГПа, тобто на 31 % для габро;

б) з 89 ГПа до 64 ГПа, тобто на 28 % для граніту;

в) з 77 ГПа до 48 ГПа, тобто на 37 % для пісковика.

4. Аналітично встановлено та експериментально підтверджено:

- зниження енергоємності руйнування від частоти навантажень вибою

кумулятивним вибуховим ядром, а саме:

а) експоненціальне для габро з 279 до 254 кВт·год/м<sup>3</sup> або на 9 %;

б) експоненціальне для граніту з 240 до 209 кВт·год/м<sup>3</sup> або на 13 %;

в) квадратичне для пісковика з 227 до 192 кВт·год/м<sup>3</sup> або на 16 %.

- зниження енергоємності руйнування від температури вибуху, за

експоненціальним законом для:

а) габро на 4 % від 279 кВт·год/м<sup>3</sup>;

б) граніту на 6 % від 240 кВт·год/м<sup>3</sup>;

в) пісковика на 7 % від  $227 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3$ .

5. Забезпечено зростання продуктивності руйнування для:

а) габро з 9,23 до 10,06 м/год, або на 9 %;

б) граніту з 13,95 до 15,9 м/год, або на 13 % ;

в) пісковика з 14,63 до 16,68 м/год, або на 14 %.

6. Знижено час на руйнування  $1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$  зразків ГП:

а) з 6,5 хв до 5,9 хв, або на 9 % для габро;

б) з 4,3 хв до 3,7 хв, або на 13 % для граніту;

в) з 4,1 хв до 3,5 хв, або на 15 % для пісковика.

7. Встановлено, що результати математичного моделювання та експериментальної апробації корелюють за критерієм Фішера, що рівний 1,04 для габро, 1,57 для граніту, 1,89 для пісковика, і підтвердила адекватність запропонованої математичної моделі реальним процесам вибухо-механічної руйнування ГП.

Результати експериментальної апробації за розділом опубліковано в: [144] – встановлено зниження швидкості ультразвукових хвиль в зразках ГП від частоти навантажень кумулятивним вибуховим ядром [145] – експериментальна апробація вибухо-механічного руйнування гірських порід.



## РОЗДІЛ 5

### ПРОМИСЛОВЕ ВПРОВАДЖЕННЯ

### ВИБУХО-МЕХАНІЧНОГО РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД

#### 5.1 Місце впровадження вибухо-механічного руйнування граніту

Практична реалізація вибухо-механічного способу руйнування ГП проведена на ПП «Давидівський гранітний кар'єр». Давидівське родовище розташовано в південно-східному напрямку від села Давидівка Житомирської області. Корисні копалини Давидівського родовища представлені слабо порушеними вивітрюванням і свіжими гранітами. Видобувні роботи проводяться двома уступами висотою до 11...15 м. Кут відкосу видобувних уступів 80°. Вихід негабариту при існуючій технології передбачається до 15 %.

Згідно з паспортом родовища межа міцності на стиснення гранітів становить 165 МПа, щільність - 2627...2765 кг/м<sup>3</sup>. До скельних розкривних ГП на родовищі відносяться жорстка і вивітрена граніти товщиною від 1,4 м до 6,4 м. Гідрогеологічні умови родовища сприятливі для його розробки відкритим способом. Жодна із розвідувальних свердловин не проходила водоносний горизонт. Необовденість граніту вказує на те, що їх міцність не знижується в місцях водонасичення [146].

Промислове впровадження вибухо-механічного руйнування граніту проведено на базі установки для горизонтального буріння шпурів, рис. 5.1. Оскільки експериментальний пристрій є повнорозмірним (розділ 4) його конструктивні елементи застосовано на промисловій установці, рис. 5.1. З метою зниження енерговитрат на руйнування граніту існуючу установку оснащено вертлюгом модифікованим (ВГМ) 2 та ріжучим інструментом комбінованої дії 3, розділ 2, 4. Установка призначена для формування шпурів діаметром до 75 мм глибиною до 5 м. Склад та принцип дії промислової

установки відповідає роботі експериментального пристрою, описання якого наведено у розділі 2.

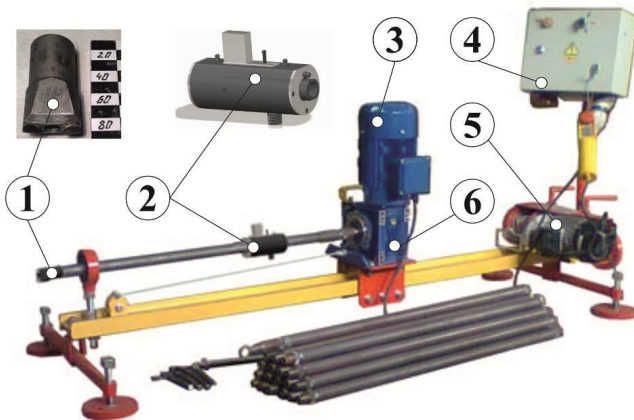


Рис. 5.1. Промислова установка вибухо-механічного руйнування гірських порід: 1 - ріжучий інструмент комбінованої дії; 2 - вертлюг модифікований; 3 – електродвигун; 4 – блок управління; 5 – електролебідка; 6 - черв'ячний редуктор

Електродвигун 3 має потужність 4,3 кВт, та максимальну кутові швидкість 300 рад/с, рис. 5.1. Живиться від промислової мережі 380 В. Кутова швидкість електродвигуна обмежена налаштуваннями блоку управління до 180 рад/с, що відповідає вимогам експлуатації черв'ячного редуктора 6, рис. 5.1. Передаточне число черв'ячного редуктора 6 рівне 8 в.о., тобто максимальна кутова швидкість ріжучого інструмента 1 складає 22 рад/с. та відповідає вимогам ВІТР [93], рис. 5.1. Подача ріжучого інструмента на вибій з зусиллям 2,4 кН, відповідно до [93], забезпечує електролебідка 5 потужністю 1 кВт, рис.5.1.

## 5.2 Впровадження вибухо-механічного руйнування

За результатами експериментальної апробації встановлена необхідна частота навантажень вибою КВЯ рівна  $0,2 \dots 0,4$  Гц, розділ 4. Тому промислова апробація проведена в трьох режимах: традиційним способом (без вибухів); один вибух за п'ять секунд ( $0,2$  Гц); один вибух за дві секунди ( $0,4$  Гц).

Для автоматичної подачі зарядів ВР до продувного каналу розроблено механізм переривчастого поступально-зворотного руху на основі Мальтійського механізму [147].

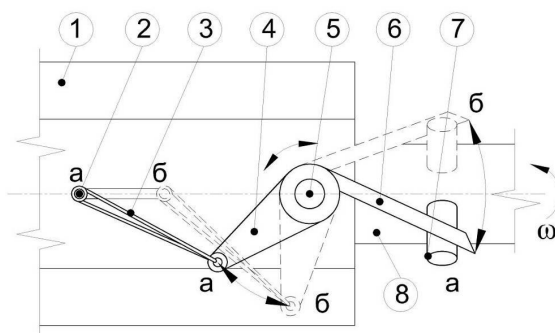


Рис. 5.2. Механізм переривчастого поступально-зворотного руху для автоматичної подачі зарядів вибухової речовини до продувного каналу: 1 – корпус вертлюга; 2 – затвор; 3 – ланцюг з'єднувальний; 4 – важіль тяговий; 5 – стрижень механізму; 6 – важіль контактний; 7 – палець ведучої ланки; 8 – ведуча ланка

Під час обертання ведучої ланки 8 палець 7 штовхає важіль контактний 6, переводячи його з положення «а» в положення «б», рис. 5.2. Відповідно в положення «б» переводиться важіль тяговий 4 завдяки обертанню стрижня механізму 5 навколо своєї осі, рис. 5.2. Разом з важелем тяговим в положення «б» переходить затвор 2 завдяки ланцюговому зчепленню 3, рис. 5.2. Це дозволяє заряду ВР надходити до продувного каналу, розділ 2. По мірі

обертання ведучої ланки, за положенням «б» палець зіскакує з важеля контактного 6. При цьому спрацьовує пружина затвора (розділ 2) та переводить механізм в положення «а», рис. 5.2.

Енергоємність руйнування граніту визначалась за показниками промислового ватметра типу Ц301-Ю (ГОСТ 30012.1-2002), електронного фіксатора часу типу ИВПР-203М (ТУ 4282-001-33865949-2009). Застосований ватметр є вібро- та ударостійким, його корпус має захист від проникнення пилу твердих часток та води, відповідно до класу захисту IP-40. Прилад призначено для роботи у трифазній мережі змінного струму з частотою (50...60) Гц. Діапазон вимірювання потужності (0...10) кВт. Перелічені параметри ватметра Ц301-Ю відповідають умовам роботи промислової установки та допускають його застосування у технологічному процесі кар'єру.

Фіксатор часу ИВПР-203М живиться від побутової електромережі 220 В, 50 Гц. Тому передбачена додаткова мережа 220 В, щоб не ускладнювати схему підключення електроприладів до промислової мережі 220 В. Прилад має діапазон вимірювання від 0,2 мс до 999999 с. Передбачена енергонезалежна пам'ять на 100 вимірювань. Автоматичне визначення середніх значень за результатами вимірювань. Одночасне зображення найменших, найбільших та середніх значень вимірювань, що дозволяє проводити вибірку найбільш надійних результатів.

Щоб отримати питому енергоємність руйнування граніту визначено об'єм утворених шпурів за показниками лазерного далекоміра типу Hilti PD-E (ISO 17123-4:2012). У приладі передбачена функція автоматичного розрахунку об'єму шпуру за показниками його глибини та діаметра. Клас захисту IP55 та дисплей на електронних чорнилах дозволяє працювати з приладом на відкритій місцевості у виробничих умовах. Вбудована пам'ять на 30 вимірювань забезпечує зручність проведення досліджень.

Згідно з рекомендаціями ВІТР [93] руйнування граніту відбувалось при зусиллі подачі 2,4 кН та кутовій швидкості 22 рад/с. Схема підключення вимірювальних приладів зображена на рис. 5.2. Згідно з розподілом Стьюдента

кількість повторних вимірювань в кожній точці рівна 4 при довірчій імовірності 95 % та коефіцієнті Стюдента 2,80 в.о.. Так сформовано по 4 шпури діаметром 36 мм традиційним способом, у вибухо-механічному режимі з 0,2 Гц та 0,4 Гц за час 0,1 год.

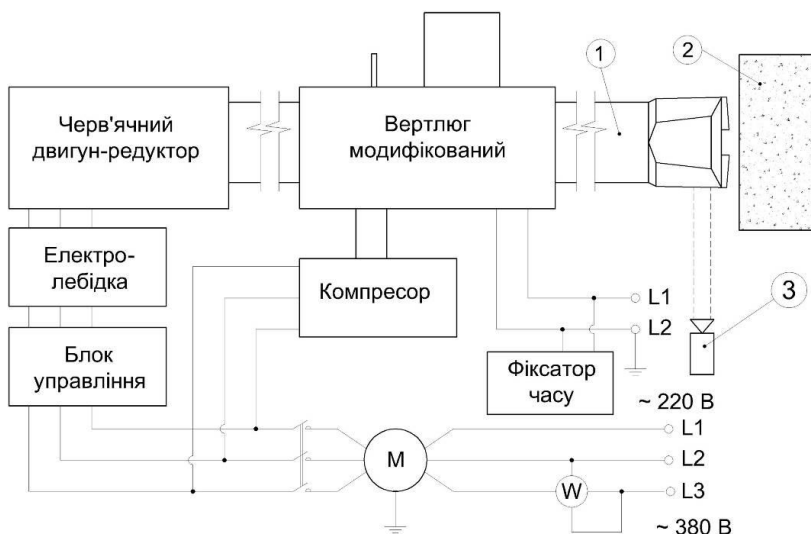


Рис. 5.2. Функціональна схема промислової установки вибухо-механічного руйнування гірських порід: 1 – ріжучий інструмент комбінованої дії; 2 – масив граніту; 3 – інфрачервоний термометр

Зміна температури ріжучого інструмента внаслідок дії вибуху визначалася термометром інфрачервоної дії Hioki FT3700 (ISO 9001, ISO 14001). Діапазон вимірювання становить 213...823 К, що перевищує максимально можливу температуру ріжучого інструмента під час руйнування скельних ГП 500...800 К [88]. Час спрацювання термометра становить 1 с, його достатньо для своєчасного визначення температури ріжучого інструмента. За показниками термометра встановлено, що температура ріжучого інструмента під час вибуху зростає на 9 К – з 299 К до 308 К, та знижується без продувки стисненим повітрям на 0,5 К за секунду. Тому заряди подавались до вибою

через кожні 2 (0,4 Гц) та 5 секунд (0,2 Гц), що забезпечило винесення зруйнованого граніту на поверхню та охолодження ріжучого інструмента. Інтервал затримки продувки визначався часом детонації заряду і складає близько 20...30 мкс [67]. Такий режим продувки, згідно з дослідженнями інших авторів [88] дозволяє підтримувати температуру різців не більше 500 К.

Значення питомої енергоємності, визначені за показниками вимірювальних пристроїв під час промислової апробації, розраховано за (5.1) винесено до таблиці 5.1. Послідовність промислового експерименту наступна. У режимі 3 зафіксовано необхідний час руйнування з урахуванням інтервалів між вибухами. Руйнування у режимі 1 та 2 проведено за час, визначений під час режиму 3.

Питома енергоємність руйнування граніту в технологічному процесі ПП «Давидівського гранкар'єру» в режимі 3 складає:

$$\epsilon = \frac{N \cdot t}{V} = \frac{3816 \cdot 0,1}{0,00203} = 188 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3, \quad (5.1)$$

де  $N = 3816$  – потужність промислової установки, що споживається під час руйнування граніту в режимі 3, згідно зі значеннями ватметра Ц301 під час промислового експерименту, Вт;  $t = 0,1$  – час руйнування граніту промисловою установкою в режимі 3, згідно зі значеннями електронного фіксатора часу типу ИВПР-203М, під час промислового експерименту, год;  $V = 203 \cdot 10^{-5}$  – об'єм зруйнованого граніту промисловою установкою в режимі 3, згідно зі значеннями лазерного далекоміра Hilti PD-E, під час промислового експерименту, м<sup>3</sup>.

Аналогічно визначена питома енергоємність для режиму 2 та режиму 3, і склала відповідно 193 кВт·год/м<sup>3</sup> та 188 кВт·год/м<sup>3</sup>. Зафіксовано зниження енергоємності вибухо-механічного руйнування граніту з 201 кВт·год/м<sup>3</sup> до 188 кВт·год/м<sup>3</sup> або на 7 %, в порівнянні з традиційним способом руйнування. Визначено, що продуктивність руйнування граніту зросла на 6 % від 19,2 м/год.

Важливо відмітити, що із застосуванням вибухо-механічного руйнування граніту знизилась споживча потужність промислової установки з 3859 Вт (режим 1) до 3782 Вт (режим 2) та 3816 Вт (режим 3). Це пояснюється зниженням механічного навантаження на ріжучий інструмент внаслідок послаблення вибою сукупністю внесеної технологічної тріщинуватості та природної.

Таблиця 5.1

**Результати вимірювань енергоємності руйнування граніту вибухо-механічним способом**

Режими руйнування граніту	Потужність установки $P$ , Вт	Час руйнування $t$ , год	Об'єм зруйнованого граніту $V \cdot 10^{-5}$ , $m^3$	Питома енергоємність руйнування $e$ , кВт·год/ $m^3$
1	2	3	4	7
Режим 1 (0 Гц)	3859	0,1	192	201
Режим 2 (0,2 Гц)	3782	0,1	196	193
Режим 3 (0,4 Гц)	3816	0,1	203	188

Згідно з таблицею час на руйнування  $192 \cdot 10^{-5} m^3$  граніту в режимі 1 становить 0,1 год. Руйнування цього ж об'єму в режимі 3 у перерахунку становить 0,09 год. Отже час руйнування  $1 m^3$  гранітів знизився з 52,0 год до 46,8 год.

З отриманих значень побудовано експериментальну залежність 3, отриману в промислових умовах, питомої енергоємності руйнування граніту вибухо-механічним способом від частоти навантажень вибою КВЯ, рис. 5.3. Встановлено, що промислова залежність  $f=e(n)$  як аналітична та експериментальна має спадаючий експоненціальний характер, рис. 5.3. Розбіжність між залежностями, отриманими в промислових та лабораторних умовах рівна 10...16 %. Це пояснюється тим, що межа міцності на стиснення

експериментальних зразків граніту рівна 180 МПа, а промислового граніту – 165 МПа.

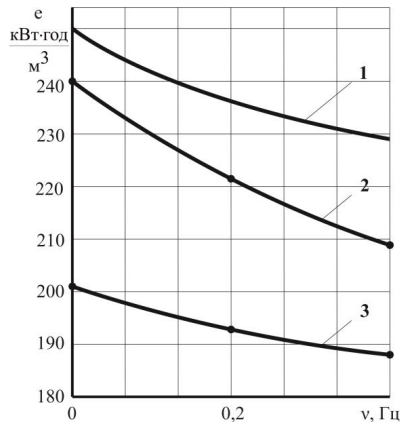


Рис. 5.3. Залежності енергоємності руйнування гранітів від частоти навантажень кумулятивним вибуховим ядром: 1 – аналітична залежність; 2 – експериментальна в лабораторних умовах; 3 – промислова в технологічному процесі ПП «Давидівський гранкар'єр»

Також зафіксовано зниження інтенсивності падіння енергоємності руйнування гранітів під час промислових досліджень 3, в порівнянні з експериментальними 2, рис. 5.3. Залежність 2 має тангенс кута падіння  $\text{tg}(27^\circ) = 0,50$ , а залежність 3 -  $\text{tg}(12^\circ) = 0,21$ , рис. 5.3. Це пов'язано з тим, що граніти на кар'єрі знаходяться в об'ємно-напруженому стані, тобто у всебічному стисненні. Отже міцність граніту в масиві більша ніж у лабораторних зразків, що підтверджується [148].

Оскільки запропонований спосіб руйнування ГП передбачає одночасне вибухове та механічне навантаження на вибій, правила техніки безпеки розроблено на основі аналізу існуючих норм щодо проведення вибухових та бурових робіт [149, 150]. Згідно з [149] промислову установку розташовано на заздалегідь спланованій ділянці уступу поза призмою обрушення та не ближче



ніж 2 м від бровки уступу. Для забезпечення стійкості установки основа майданчика є монолітною та не містить шматків ГП. Гвинти фіксації установки розміщуються в завчасно сформовані отвори в ГП майданчика для жорсткого горизонтального зчеплення. Конструкція установки передбачає блок управління процесом руйнування, що дозволяє оператору працювати дистанційно. Для переміщення установки її розбирають на окремі елементи. Переміщення відбувається на завчасно спланованому та підготовленому маршруті в горизонтальній площині. Ділянка, на якій проводяться вибухо-механічне руйнування ГП огорожена попереджувальними знаками. Блоком управління передбачено гальмо лебідки, що обмежує надмірну зворотну подачу ріжучого інструмента. Трос лебідки розраховано на зусилля подачі ріжучого інструмента в 2,4 кН та має п'ятикратний запас міцності. Заміна троса відбувається при 10 % зірваних дротів. Ширина берми уступу для проведення вибухо-механічного руйнування ГП обирається не меншою ніж 4 м.

Вибухова частина руйнування ГП запропонованим способом проводиться із застосуванням ВР типу ЗКМ, що обрано відповідно до [151]. Обрані в розділі 4 ВР відповідають вимогам [150, 151] та технологічним умовам застосування, а саме: забезпечують кероване внесення технологічної тріщинуватості вибою, можливість механізованого заряджання. Збудження зарядів відбувається електронним детонатором, до якого імпульсно подається напруга 220 В. Згідно з лабораторними експериментами (розділ 4) напруги 220 В достатньо для безвідмовної дії обраних зарядів ВР. Для уникнення уражень струмом передбачена продувка свердловини повітрям. Згідно з паспортом Давидівського родовища наявна відсутність водонасичених горизонтів, що безпечно у випадку застосування електричного ініціювання зарядів. Заряди ВР доставляються до місця проведення робіт в касетах для ВГМ, відповідно до вимог [133]. Вибухо-механічне руйнування забезпечує оператор установки під керівництвом майстра-підrivника. Оператор та підrivник забезпечені спецодягом, взуттям, окулярами та засобами індивідуального захисту [152]. Зв'язок між оператором та майстром-підrivником здійснюється за допомогою рацій. Одяг не повинен

накопичувати статичної електрики, оскільки застосовуються електродетонатори. У випадку відмови заряду передбачено застосування додаткового накладного заряду з пневмодетонатором, розділ 2.

Безпечна відстань від робочої промислової установки обумовлена вильотом шматків ГП зі свердловини під дією тиску продувного повітря та імпульсних впливів продуктів детонації. Крім цього існує небезпека розриву троса лебідки або інших конструктивних елементів установки. Тому згідно з рекомендаціями, щодо експлуатації промислових установок [153] встановлено безпечну відстань рівною 8 м, рис. 5.4.

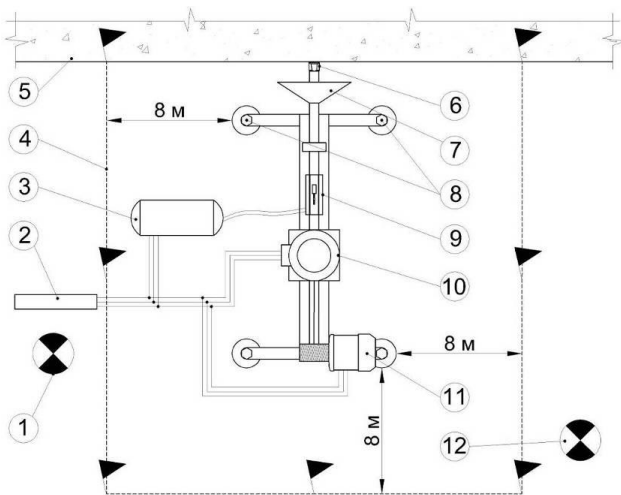


Рис. 5.4. План розміщення об'єктів під час вибухо-механічного руйнування гірських порід: 1 – місце знаходження оператора промислової установки; 2 – блок управління; 3 – компресор; 4 – контур небезпечної зони з попереджувальними знаками; 5 – масив гірських порід; 6 – ріжучий інструмент комбінованої дії; 7 – пристрій захисту від розльоту шматків гірських порід та шламу; 8 – фіксуючі болти; 9 - вертлюг модифікований; 10 – черв'ячний двигун-редуктор; 11 – електролебідка; 12 – місце знаходження майстра-підrivника

Питома витрата ВР для режиму 3:

$$B = \frac{m \cdot n \cdot k_{\text{гр}}}{V_3} = \frac{0,0005 \cdot 144 \cdot 0,37}{0,00203} = 13,12 \text{ кг/м}^3, \quad (5.2)$$

де  $m = 0,0005$  – маса вибухової речовини одного заряду, згідно з розділом 4, кг/зар;  $n = 144$  – кількість зарядів, використаних в режимі 3 (0,4 Гц), зар;  $k_{\text{гр}} = 0,37$  – коефіцієнт використання вибуху під час вибухо-механічного руйнування граніту, згідно з розділом 4, в.о.;  $V_3 = 203 \cdot 10^{-5}$  – об'єм, зруйнованого граніту в режимі 3, згідно з таблицею 5.1,  $\text{м}^3$ .

Аналогічно питома витрата ВР розрахована для режиму 2 і становить  $3,12 \text{ кг/м}^3$ .

Згідно з [87] під час детонації ВР на основі перхлорату калію виділяється близько  $334,4 \text{ л/кг}$  газоподібних продуктів. Встановлено [87], що під час вибуху сумішей перхлорату калію з металами переважно виділяються наступні газоподібні продукти:  $\text{O}_2$ ;  $\text{KCl}$ ;  $\text{K}_2\text{O}$ ;  $\text{ClO}$ ;  $\text{Cl}_2$ ;  $\text{K}$ ; хлорати та оксиди металів. Крім кисню, решта газоподібних продуктів після вибуху перетворюються в шлам, та виноситься зі свердловини стисненим повітрям разом зі зруйнованою ГП. Отже застосована ВР ( $\text{KClO}_4 + \text{Mg}$ ) в результаті детонації не утворює шкідливих газоподібних речовин, таких як  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ . У випадку застосування вибухо-механічного способу руйнування ГП в умовах шахти, необхідно дотримуватись концентрації метану на вибої не більше 1 % згідно з НПАОП 0.00-1.66-13. Для цього потрібно кожні 10 хвилин проводити вимірювання концентрації метану на вибої.

Пилепридушення забезпечується пристроєм 7 від розльоту шматків ГП та шламу, рис. 5.4. При надмірному пилоутворенні можливе застосування зрошувальних технологій.

Оскільки промислова установка є електричною, вона більш екологічна в порівнянні з тими, що працюють на рідкому паливі. При цьому 63,1 % [154]

електричної потужності, виробленої в Україні, забезпечують теплові електростанції, що працюють на вугіллі. За період з 2010 по 2012 рік потужність ТЕЦ зросла з 85,94 ТВт·год до 96,54 ТВт·год [154]. Відомо [155], що для вироблення 1 кВт·год необхідно спалити 270 г вугілля. Це еквівалентно виділенню в середньому 0,45 кг CO<sub>2</sub> в Україні станом на 2011 рік згідно зі звітом Міжнародного енергетичного агентства [156]. Тому зниження питомої енергоємності руйнування граніту з 201 кВт·год/м<sup>3</sup> до 188 кВт·год/м<sup>3</sup> або на 13 кВт·год/м<sup>3</sup> сприяє зниженню викидів CO<sub>2</sub> на 5,85 кг.

### 5.3 Економічний ефект вибухо-механічного руйнування

Розрахунок економічного ефекту виконано за умов впровадження вибухо-механічного руйнування гранітів у технологічному процесі ПП «Давидівський гранкар'єр». Річний економічний ефекту від впровадження нового вибухо-механічного способу руйнування ГП розраховано згідно з [157]:

$$E_{\text{ВМ}} = \left[ \left( C_{\text{тр}} + \eta_{\text{н}} \cdot K_{\text{тр}} \right) - \left( C_{\text{ВМ}} + \eta_{\text{н}} \cdot K_{\text{ВМ}} \right) \right] \cdot V_{\text{ВМ}} =$$

$$= \left[ (3545 + 0,77 \cdot 1800) - (3316 + 0,77 \cdot 1003) \right] \cdot 30 = 25280 \text{ грн/рік}, \quad (5.1)$$

де  $C_{\text{тр}} = 3545$  – питома собівартість руйнування граніту традиційним способом, розраховано за формулою 5.2, грн/ м<sup>3</sup>;  $\eta_{\text{н}} = 0,77$  – нормативний коефіцієнт корисної дії руйнування граніту традиційним способом, розраховано за формулою 5.3, в.о.;  $K_{\text{тр}} = 1800$  – питомі капіталовкладення на руйнування граніту традиційним способом, згідно з даними ПП «Давидівський гранкар'єр», грн/ м<sup>3</sup>;  $C_{\text{ВМ}} = 3316$  – собівартість руйнування 1 м<sup>3</sup> граніту вибухо-механічним способом, розраховано за формулою 5.4, грн/ м<sup>3</sup>;  $K_{\text{ВМ}} = 1003$  – питомі капіталовкладення на руйнування 1 м<sup>3</sup> граніту вибухо-механічним способом,

розраховано за формулою 5.5, грн/ м<sup>3</sup>; V<sub>вм</sub> = 30 - річний об'єм руйнування граніту, згідно з об'ємом робіт ПП «Давидівський гранкар'єр», м<sup>3</sup>/рік.

Питома собівартість руйнування 1 м<sup>3</sup> граніту традиційним способом рівна:

$$C_{\text{тр}} = c_{\text{е}} \cdot e_{\text{тр}} + c_2 + c_3 = 1,19 \cdot 201 + 3200 + 93 = 3545 \text{ грн/м}^3, \quad (5.2)$$

де c<sub>1</sub> = 1,19 – питома вартість електроенергії для добувної промисловості, відповідно до Закону України «Про електроенергетику» [158], грн/кВт·год; c<sub>2</sub> = 3200 – питома вартість оренди установки вибухо-механічної дії, згідно з тарифами орендодавця, грн/м<sup>3</sup>; c<sub>3</sub> = 93 – питома заробітна плата оператора установки вибухо-механічної дії, грн/ м<sup>3</sup>.

Нормативний коефіцієнт корисної дії руйнування граніту:

$$\eta_{\text{н}} = \frac{e_{\text{тр}} \cdot V}{(n_1 + n_2) \cdot t_{\text{тр}}} = \frac{201000 \cdot 0,00192}{(3500 + 1500) \cdot 0,1} = 0,77 \text{ в.о.}, \quad (5.3)$$

де e<sub>тр</sub> = 201 – питома енергоємність руйнування граніту у режимі 1, таблиця 5.1, кВт·год/м<sup>3</sup>; V = 192·10<sup>-5</sup> - об'єм граніту, що руйнується для промислового експерименту, м<sup>3</sup>; n<sub>1</sub> = 3,5 – потужність електродвигуна установки вибухо-механічної дії, рис. 5.1, кВт; n<sub>2</sub> = 1,5 – потужність електролебідки установки вибухо-механічної дії, рис. 5.1, кВт; t<sub>тр</sub> = 0,1 - час руйнування об'єму граніту V, що руйнується для промислового експерименту, год.

Питома собівартість руйнування 1 м<sup>3</sup> граніту вибухо-механічним способом:

$$C_{\text{вм}} = e_{\text{вм}} \cdot c_1 + c_2 + c_3 = 188 \cdot 1,19 + 3000 + 93 = 3316 \text{ грн/м}^3, \quad (5.4)$$

де  $\epsilon_{\text{ВМ}} = 188$  – питома енергоємність руйнування граніту традиційним способом, за результатами промислового експерименту, кВт·год/м<sup>3</sup>;  $c_1 = 1,19$  – питома вартість електроенергії для добувної промисловості, відповідно до Закону України «Про електроенергетику» [158], грн/кВт·год;  $c_2 = 3000$  – питома вартість оренди установки вибухо-механічної дії, згідно з тарифами орендодавця, грн./м<sup>3</sup>;  $c_3 = 93$  – питома заробітна плата оператора установки вибухо-механічної дії, грн./ м<sup>3</sup>.

Питомі капіталовкладення на руйнування граніту вибухо-механічним способом:

$$K_{\text{ВМ}} = \frac{(K_1 + K_2)}{V_{\text{ВМ}}} = \frac{10000 + 20100}{30} = 1003 \text{ грн/м}^3, \quad (5.5)$$

де  $K_1 = 10000$  – витрати на науково-дослідницьку діяльність під час розробки вибухо-механічного руйнування ГП, грн.;  $K_2 = 20100$  – дослідно-конструкторські роботи, щодо виготовлення ріжучого інструмента комбінованої дії, вертлюга модифікованого та зарядів ВР, грн.

Термін окупності для умов технологічного процесу ПП «Давидівський гранкар'єр»:

$$T = \frac{K_{\text{ВМ}} \cdot V}{E_{\text{ВМ}}} = \frac{1003 \cdot 30}{25280} = 1 \text{ рік } 3 \text{ місяці}, \quad (5.6)$$

Визначено коефіцієнт корисної дії руйнування граніту вибухо-механічним способом:

$$\eta_{\text{H}} = \frac{\epsilon_{\text{ВМ}} \cdot V}{(n_1 + n_2) \cdot t_{\text{тр}}} = \frac{188000 \cdot 0,00192}{(3500 + 1500) \cdot 0,09} = 0,80 \text{ в.о.} \quad (5.7)$$

де  $\epsilon_{\text{вм}} = 188$  – питома енергоємність руйнування граніту у режимі 1, таблиця 5.1, кВт·год/м<sup>3</sup>;  $t_{\text{гр}} = 0,09$  - час руйнування об'єму граніту, що руйнується для промислового експерименту у режимі 3, год.

Порівнявши результати розрахунку ККД нормативного (5.3) та вибухо-механічної дії (5.7) встановлено, що ефективність запропонованого способу на 3 % більша ніж традиційного. Очікуваний економічний ефект склав 25280 грн/рік.

## **Висновки**

1. Досягнуто у виробничих умовах зниження питомої енергоємності руйнування граніту з 201 до 188 кВт·год/м<sup>3</sup> вибухо-механічним способом з формуванням кумулятивного ядра, за рахунок доповнення природних тріщин внесеними технологічними.

2. Знижено час руйнування 1 м<sup>3</sup> граніту у технологічному процесі з 52,0 год до 49,2 год вибухо-механічним способом, що забезпечило зростання продуктивності руйнування на 6 % від 19,2 м/год.

3. Встановлено, що зниження питомої енергоємності руйнування граніту з граніту з 201 кВт·год/м<sup>3</sup> до 188 кВт·год/м<sup>3</sup> сприяє зниженню викидів СО<sub>2</sub> на 6 % від 90,45 кг.

4. Забезпечено зростання коефіцієнта корисної дії з 0,77 в.о. до 0,80 в.о., або на 3 % за рахунок зниження витраченої енергії під час промислової апробації вибухо-механічного руйнування граніту.

5. Досягнуто зниження питомої витрати ВР з 28,60 кг/м<sup>3</sup> до 13,12 кг/м<sup>3</sup> за рахунок концентрації кумулятивного вибухового ядра на вибій.

6. Очікуваний річний економічний ефект вибухо-механічного руйнування, впровадженого у виробничих умовах складає 25280 гривень. Орієнтовний період окупності впровадження вибухо-механічного руйнування гірських порід рівний 1 рік 3 місяці.

## ЗАКЛЮЧЕННЯ

1. Аналітично встановлено та експериментально підтверджено:

**зниження питомої енергосмності** руйнування гірських порід від частоти навантажень кумулятивним вибуховим ядром, а саме: з 279 до 254 кВт·год/м<sup>3</sup> або на 9 % для габро; з 240 до 209 кВт·год/м<sup>3</sup> або на 13 % для граніту; з 227 до 191 кВт·год/м<sup>3</sup> або на 16 % для пісковика.

**зниження питомої енергосмності руйнування** від температури вибуху, а саме: габро на 4 % з 279 до 267 кВт·год/м<sup>3</sup>; граніту на 6 % з 240 до 227 кВт·год/м<sup>3</sup>; пісковику на 7 % з 227 до 211 кВт·год/м<sup>3</sup>.

2. Досягнуто **зниження питомої витрати вибухової речовини** з 28,60 кг/м<sup>3</sup> до 13,12 кг/м<sup>3</sup> за рахунок концентрації енергії вибуху на вибій.

3. Визначено, що за зміною модуля пружності I роду раціональне співвідношення вибухових та механічних навантажень становить відповідно 31 % та 69 % для габро; 28 % та 72 % для граніту; 37 % та 63 % для пісковика.

4. Забезпечено **зростання** швидкості руйнування гірських порід: на 9 % від 9,23 м/год для габро; на 13 % від 13,95 м/год для граніту; на 14 % від 14,63 м/год для пісковика.

5. Досягнуто у виробничих умовах **зниження питомої енергосмності руйнування граніту** вибухо-механічним способом за рахунок доповнення природних тріщин внесеними технологічними кумулятивним вибуховим ядром з **201 до 188 кВт·год/м<sup>3</sup>**.

6. В результаті впровадження вибухо-механічного руйнування гірських порід на створеному повнорозмірному експериментальному пристрої **коефіцієнт корисної дії** зріс з **77 % до 80 %**.

7. **Економічний ефект** вибухо-механічного руйнування, впровадженого у виробничих умовах складає **25 280 гривень**. Орієнтовний період окупності впровадження вибухо-механічного руйнування гірських порід рівний 1 рік 3 місяці. Новизна проведених досліджень підтверджена патентом України «Спосіб комбінованого вибухо-механічного руйнування гірських порід».



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дерев'янюк О.В. Аналіз якості та технологій видобування відкритим способом природного каменю з родовищ Житомирської області // Вісник ЖДТУ. – 2008. - № 4 (47). – С. 201–205.
2. Тангаев И. А. Энергоемкость процессов добычи и переработки полезных ископаемых [Текст] / И. А. Тангаев. – М. : Недра, 1986. - 231 с.
3. Степин П.А. Сопротивление материалов. – М.: Высшая школа, 1988. – 367 с.
4. Баум Ф. А. Физика взрыва [Текст] / Ф. А. Баум, К. П. Станюкович, Шехтер Б. И. – М. : Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. – 800 с.
5. Бойко В. В. Оценка сейсмобезопасности сооружений при воздействии на них взрывных волн с учетом их спектральных характеристик [Текст] / В. В. Бойко, А. А. Кузьменко, Т. В. Хлевнюк // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво». - № 16. – 2008. – С. 3 – 13.
6. Вовк А. А. Закономерности деформаций грунтов и горных пород при динамических воздействиях [Текст] / А. А. Вовк, З. Барановский, В. Г. Кравец, Б. Кузея. – К. : Институт гидромеханики НАНУ, 1996. – 170 с.
7. Кравець В. Г. Пат. 58301 Україна, МПК 7E21C37/18. Спосіб руйнування скельних порід та пристрій для його здійснення [Текст]: / В. Г. Кравець, В. І. Плужник, О. С. Жмуденко, С. Л. Калюжний ; Заявник та патентовласник : Кравець В. Г. ; заявл. 22.11.2002 ; опубл. 15.07.2003. Бюл. №7. – 3 с.
8. Лаврентьев М. А. Кумулятивный заряд и принцип его работы [Текст] / М. А. Лаврентьев // Успехи математических наук. – 1957. - № 4. – С. 41 – 56.
9. Орленко Л. П. Физика взрыва и удара [Текст] / Л. П. Орленко. – М. : Физматлит, 2006. – 304 с. – ISBN 5-9221-0638-4.

10. Станюкович К. П. Основы теории действия взрыва [Текст] / К. П. Станюкович, Л. П. Орленко. – М. : ВИА, 1964. – 163 с.

11. Фортов В. Е. Мощные ударные волны и экстремальное состояние вещества [Текст] / В. Е. Фортов, // Успехи физических наук. – 2007. – Т. 177. - № 4. – С. 347 – 368.

12. Про затвердження Державної цільової економічної програми енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010-2015 роки [Текст]: Постанова Кабінету міністрів України від 01 квітня 2010 р. № 243 // Офіційний вісник України. - 2010. – № 16. – С. 116. – Ст. 762.

13. Енергетична стратегія України на період до 2035 року [Текст]. - Національний інститут стратегічних досліджень, 2014. – Режим доступу : [http://www.niss.gov.ua/public/File/2014\\_nauk\\_an\\_rozrobku/Energy%20Strategy%202035.pdf](http://www.niss.gov.ua/public/File/2014_nauk_an_rozrobku/Energy%20Strategy%202035.pdf).

14. Воздвиженский Б. И. Современные способы бурения скважин [Текст] / Б. И. Воздвиженский, А. К. Сидоренко, А. Л. Скорняков. – 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Недра, 1978. – 342 с.

15. Ребрик Б. М. Вибрационное бурение скважин [Текст] / Б. М. Ребрик. – М. : Недра, 1974. – 192 с.

16. Подэрни Р. Ю. Анализ конструкций и технологических возможностей современных станков вращательного бурения взрывных скважин на открытых работах [Текст] / Р. Ю. Подэрни // Горная техника. – 2008. – № 2. - С. 116-125.

17. Демина Г. А. Шарошечные долота фирмы Sandvik [Текст] / Г. А. Демина // Горная промышленность. – 1996. - № 1. – С 10.

18. Гапелюк В. Г. Улучшение рабочих параметров шарошечных буровых станков БСШ-2М и СБШ-200 [Электронный ресурс] / В. Г. Гапелюк. – Гайский горнообогатительный комбинат. - Режим доступа: [http://www.sgb.com.ua/index.php?option=com\\_content&view=article&id=219:ryda&catid=2:gornoe-delo&Itemid=4](http://www.sgb.com.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=219:ryda&catid=2:gornoe-delo&Itemid=4).

19. БС-3 – буровой станок ударно-канатного бурения: технические характеристики [Электронный ресурс]. - ООО «Амурский металлист», 2015. – Режим доступа: <http://www.amurmet.com/bs3.shtml>.

20. Лукьянов В. Г. Взрывные работы [Текст] : учебник для ВУЗов / В. Г. Лукьянов, В. И. Комащенко, В. А. Шмурыгин. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 402 с. – ISBN 5-98298-376-4.

21. Скрипченко Т. А. Буровой инструмент Atlas Copco [Текст] / Т. А. Скрипченко // Капстроительство. – 2012. - № 1. – С. 44 – 45.

22. Ершов П. Э. Создание технологий ударно-вращательного бурения на основе избирательной передачи энергии удара [Электронный ресурс] / Молодежь и наука: сборник материалов IX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. — Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2013. — Режим доступа: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/section074.html>.

23. Лаврушко П. Н. Эксплуатация нефтяных и газовых скважин [Текст] / П. Н. Лаврушко, В. М. Муравьев. – М. : Недра, 1971. – 367 с.

24. Buckman W. G. Sand jetting [Электронный ресурс]. - Buckman jet drilling, 2015. – Режим доступа: <http://www.buckmanenergyservices.com/sand-jetting.html>.

25. Островский А. П. Новые процессы бурения глубоких скважин [Текст] / А. П. Островский. – М. : Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы, 1960. – 187 с.

26. Black W. L. Investigation of techniques in explosive drilling [Text] / W. L. Black. – Baltimore : AAI Corporation, 1973. – 67 p.

27. Белин В. А. Управление параметрами взрыва при подготовке руд к выщелачиванию [Текст] / В. А. Белин, А. В. Логачев, Т. Т. Исмаилов // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2008. – №3. – С. 46-51.

28. Технология строительного производства [Текст] / Атаев С. С., Данилов Н. Н., Прыкин Б. В. [и др.]. – М. : Стройиздат, 1984. – 559 с.

29. Raether R. J. Use of high pressure water jet for cutting granite [Текст] / R. J. Raether, R. G. Robinson, D. A. Summers // Proceedings of the second U.S. Water jet conference. – Rolla: University of Missouri-Rolla. – 1983. – P. 228 – 235.

30. Summers D. A. Water jetting technology [Текст] / Summers D. A. – Boca Raton : CRC press, 1995. – 882 p. – ISBN 0-419-19660-9.

31. Прокопов А. Ю. Перспективы развития восточного Донбасса [Текст] : сборник научных трудов Часть 1 / А. Ю. Прокопов. – Новочеркасск: УПЦ «Набла» ЮРГТУ (НПИ), 2008. – 414 с. - ISBN 978-5-88998-842-7.

32. Жабин А. Б. Обоснование параметров взаимодействия агрегированного механогидравлического инструмента с массивом для эффективного разрушения крепких горных пород [Текст] : дис. канд. наук. : 05.05.06 / А. Б. Жабин. – Тула, 1984. – 177 с.

33. Bukman G. A. New approach to drilling [Text] / G. Buckman, Z. Pearl, W. C. Maurer // Oilfield technology. – 2013. - № 8. – P. 37 - 40.

34. Olsen J. H. Пат. 4,216,906 United States Patent. Method of making high velocity liquid jet [Text] / J. H. Olsen, H. H. George, E. K. Louis. Заявник і патентовласник: Flow Research Inc., Kent, Washington ; заявл. 21.06.76; опубл. 12.08.80. – 8 p.

35. Дзоз Н. А. Интенсификация процессов бурения с использованием гидродинамической кавитации [Текст] / Н. А. Дзоз, Ю. А. Жулай // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. - № 4. – С. 290 - 296. – ISBN 0236-1493.

36. Волков А. С. Вращательное бурение разведочных скважин [Текст] / А. С. Волков, Б. П. Долгов. – М. : Недра, 1988. – 320 с.

37. Wideman T. W. Пат. 2010/0089577A1 United States Patent. Methods and apparatus for thermal drilling [Text] / T. W. Wideman, J. M. Potter, D. Dreesen, R. M. Potter. Заявник і патентовласник: Potter Drilling Inc., Redwood City, CA ; заявл. 8.10.2009 ; опубл. 15.04.2010. – 24 p.

38. Экспериментальные исследования разупрочнения крепких горных пород при нагреве трением фрикционных элементов термомеханической

коронки. Технология подводных буровзрывных скалоуборочных работ [Текст] / С. А. Ермаков, Л. Н. Федоров, Д. С. Ващенко, Р. М. Скрыбин // Горный информационно-аналитический бюлетень. – 2012. - № 3. – С. 330 – 335. - ISBN 0236-1493.

39. Воробьев В. В. Исследования изменения ударной вязкости горных пород при низких температурах [Текст] / В. В. Воробьев, В. А. Хорошман // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. – 2011. - № 1. – С. 22 – 26.

40. Брылин В. И. Бурение скважин специального назначения: учебное пособие [Текст] / В. И. Брылин. – Томск : Издательство ТПУ, 2006. – 255 с.

41. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых [Текст] / Бродовой В. В., Глебовский Ю. С., Дмитриев В. И. [и др.] ; под ред. Н. Б. Дортмана. – 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Недра, 1984. – 455 с.

42. Юткин Л. А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности [Текст] / Л.А. Юткин. – Л.: Машиностроение, 1986. – 253 с.

43. Xu Z. Specific energy for pulsed laser rock drilling [Текст] / Z. Xu, C. B. Reed, G. Konercki // Journal of laser applications. – 2003. – Vol. 1. – P. 25-30.

44. Лазерное бурение тонких глубоких отверстий в кремнеземсодержащих материалах [Текст] / Васильев М., Журба В., Романов В. [и др.]. // Фотоника. – 2013. - № 1. – С. 18-33.

45. Laser spallation of rocks for oil well drilling [Текст] / Z. Xu, C. B. Reed, R. Parker, R. Graves // Proceedings of the 23rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics. - 2004. – Vol. 97. – ISBN 0-912035-77-3.

46. Zediker M. S. Пат. 2012/0261188A1 Unated States Patent. Method of high power laser-mechanical drilling [Text] / M. S. Zediker, B. O. Faircloth, E. C. Allen. Заявник і патентовласник: Zediker M. S. ; заявл. 23.02.2012 ; опубл. 18.10.2012. – 29 р.

47. Бергман Э. Д. Термическое разрушение горных пород плазмобурами [Текст] / Э. Д. Бергман, Г. Н. Покровский. – Новосибирск : Наука, 1971. – 127 с.

48. Jankovic A. Relationships between comminution energy and product size for a magnetite ore [Text] / A. Jankovic, H. Dundar, R. Mehta // Journal of the South Africa Institute of Mining and Metallurgy. – 2010. – Vol. 110. - P. 141 – 146.

49. Ягупов А. В. Огневое бурение взрывных скважин [Текст] / А. В. Ягупов, М.А. Покровский, А.П. Васильев. - М.: Госгортехиздат, 1962. – 200 с.

50. Киселев Ю.Я. О стоимости тепла при термическом разрушении горных пород [Текст] / Ю.Я. Киселев // Горный журнал. – 1967. - № 3. – С. 11-12.

51. Ржевский В. В. Процессы открытых горных работ [Текст] / В. В. Ржевский. – М. : Недра, 1978. – 541 с.

52. Ультразвуковая интенсификация разрушения горных пород [Текст] / Бондарец А. И., Дербас А. Г., Чернявская О. В. [и др.] // Наукові праці ДонНТУ. - 2010. - №18. - С. 131-137.

53. Barrow J. Пат. 5,549,170 Unated States Patent. Sonic drilling method and apparatus [Text] / J. Barrow. Заявник і патентовласник: Barrow J. ; заявл. 27.04.95 ; опубл. 27.08.96. – 15 р.

54. Kambiz E. J. Drill string axial vibrations and sonic head analysis [Text] / E. J. Kambiz. – Newfoundland : Memorial university, 2012. – 118 p.

55. Clarke J. Introduction to sonic drilling [Электронный ресурс]. - Geoscience Australia, 2010. – Режим доступа:  
<http://www.groundwater2010.com/documents/3EJonClarke.pdf>.

56. Шкуматов О. М. Комбінована технологія розробки прохідницького вибою криволінійно-уступної форми [Текст] / О. М. Шкуматов, В. А. Галоян // Наукові праці ДонНТУ. – 2009. – № 10. – С. 70 – 73.

57. Руководство по применению невзрывчатой расширяющей смеси НРС-1 для разрушения горных массивов, монолитных бетонных железобетонных строительных конструкций [Электронный ресурс]. - НПК «Стройреахим», 2012, – Режим доступа :  
[http://www.stroyreachim.ru/RUC\\_NRS1.pdf](http://www.stroyreachim.ru/RUC_NRS1.pdf).

58. Ребиндер П. А. Понизители твердости в бурении [Текст] / П. А. Ребиндер, Л. А. Шрейнер, К. Ф. Жигач. – М. : Издательство АН СССР, 1944. – 199 с.

59. Бурение геологоразведочных скважин с продувкой воздухом [Текст] / Б. С. Филатов, Н. С. Макурин, М. Г. Абрамсон, А. И. Кирсанов. – М. : Недра, 1964. – 248 с.

60. Acid fracturing [Электронный ресурс] / Petroleum Engineering Handbook. – Режим доступа : [http://petrowiki.org/Acid\\_fracturing](http://petrowiki.org/Acid_fracturing).

61. Akhkubekov A. Acid Tunneling Technology: Application Potential in Timano-Pechora Carbonates [Электронный ресурс]. – Society of Petroleum Engineers, 2010. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.2118/135989-MS>. - ISBN 978-1-55563-313-4.

62. Portman L. Acid-Tunneling technique shows success in carbonates [Текст] / L. Portman, A. Bouarki, M. Navarro // Journal of petroleum technology. – 2008. – № 11. - P. 28-31.

63. Pierce K. G. Advanced drilling systems study [Текст] / K. G. Pierce, B. J. Livesay, J. T. Finger // Sandia national laboratories : U.S. Department of energy. – 1996. – 163 p.

64. Про затвердження Правил безпеки під час поводження з вибуховими матеріалами промислового призначення [Текст] : Наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 12 червня 2013 р. № 355 // Офіційний вісник України. – 2013. – № 59. – Ст. 2119.

65. Зыков А. А. Основы теории графов [Текст] / А. А. Зыков. — М. : Наука, 1987. — 383 с.

66. Ершов А. П. Взрыв [Текст] / А. П. Ершов // Соросовский образовательный журнал. – 2000. – №1. – С. 85-90.

67. Физика взрыва [Текст] / Андреев С. Г., Бабкин А. В., Баум Ф. А. [и др.] ; под ред. Л. П. Орленко. – 3-е изд., доп. и перераб. - М. : Физматлит, 2004. – 656 с. - ISBN 5-9221-0220-6.

68. Федосеев В. И. Сопротивление материалов [Текст] / В. И. Федосеев. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 591 с. – ISBN 5-7038-2699-3.

69. Шевцов Н. Р. Основы теории гидровзрывания при разрушении пород [Текст] / Н. Р. Шевцов, К. Н. Лабинский, С. А. Калякин // Проблемы гірського тиску. – 2002. – №7. – С. 59-84.

70. Влияние водонасыщенности пород на их механические характеристики [Электронный ресурс] / Е. И. Кольчик, В. Н. Ревва, В. К. Костенко, А. Е. Кольчик. – Режим доступа: <http://uran.donetsk.ua/~masters/2011/igg/moroz/library/article6.htm>.

71. Прохоров А. М. Колебания кристаллических решеток [Текст] / А. М. Прохоров. – М. : Советская энциклопедия, 1984. – 944 с.

72. Friedman R. H. Пат. 3,083,778 United States Patent. Rotary drilling of wells using explosives [Текст] / R. H. Friedman, L. H. Robinson, J. H. Edwards Заявник і патентовласник: Jersey production research company, Tulsa, Oklahoma ; заявл. 26.05.1960 ; опубл. 02.04.1963. – 3 р.

73. Ford J. Пат. 3,130,797 United States Patent. Methods and apparatus for drilling bore holes [Текст] / J. Ford. Заявник і патентовласник: Sun oil company, Philadelphia, Pennsylvania ; заявл. 31.01.1961; опубл. 28.04.1964. – 7 р.

74. Frank A. Пат. 3,576,219 United States Patent. Method and apparatus for explosive drilling utilizing spark pumps for detonating explosives [Текст] / A. Frank. Заявник і патентовласник: Mobil oil corporation, Dallas, Texas; заявл. 08.09.1969 ; опубл. 27.04.1971. – 6 р.

75. Терентьев О. М. Формування комбінованого руйнування гірських порід вибухо-механічними навантаженнями [Текст] / О. М. Терентьев, П. А. Гонтарь, А. Й. Клешов // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2014. – №6 (89). – С. 131–136. – Режим доступу: [http://www.kdu.edu.ua/PUBL/statti/2014\\_6\\_131.pdf](http://www.kdu.edu.ua/PUBL/statti/2014_6_131.pdf)

76. Терентьев О.М. Энергетичні параметри кумулятивного вибухового ядра під час вибухо-механічного буріння [Текст] / О.М. Терентьев, П.А. Гонтарь, А. Шукуров // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2016. – № 5. – С. 17 – 23.



77. Хамханов К. М. Основы планирования эксперимента : учебное пособие [Текст] / К. М. Хамханов. – Улан-Удэ : Изд-во восточно-сибирского государственного технологического университета, 2001. – 50 с.
78. Дорофеева Л. И. Моделирование и оптимизация разделительных процессов: учебное пособие [Текст] / Л. И. Дорофеева. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 128 с.
79. Медведев И. Ф. Режимы бурения и выбор буровых машин [Текст] / И. Ф. Медведев. – М. : Недра, 1986. – 222 с.
80. Наружный заряд [Электронный ресурс] // Горная энциклопедия. - Режим доступа: <http://www.mining-enc.ru/n/naruzhnyj-zaryad>.
81. Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока [Текст] / Асиновский Э. Л., Лебедев Е. Ф., Леонтьев А. А. [и др.]; под ред. В. Е. Фортова – М. : Наука, 2002. – 399 с. - ISBN 5-02-002602-6.
82. Иванов Б. А. Безопасность работы с жидким кислородом [Текст] / Б. А. Иванов, А. С. Розовский. – М. : Химия, 1981. – 224 с.
83. Сысоев Н. Н. Ударные волны в газах и конденсированных средах [Текст] / Н. Н. Сысоев, Ф. В. Шугаев. – М. : Изд-во МГУ, 1987. – 133 с.
84. Гороновский И. Т. Краткий справочник по химии [Текст] / И. Т. Гороновский, Ю. П. Назаренко, Е. Ф. Некряч. - 5-е изд., перераб. и доп. – К. : Наукова думка, 1987. – 830 с.
85. Сивухин Д. В. Общий курс физики [Текст] / Д. В. Сивухин. – М. : Физматлит, 2005. – 560 с. – ISBN 5-9221-0225-7.
86. Оборудование и технология сварочного производства [Текст] / Волченко В. Н., Ямпольский В. М., Винокуров В. А. [и др.]; под. ред. В. В. Фролова. – М.: Высшая школа. – 1988. – 559 с. – ISBN 5-06-001473-8.
87. Закусило В. Р. Влияние катализаторов на термическое разложение перхлората калия и взрывчатые характеристики составов на его основе [Текст] / В. Р. Закусило, А. Н. Романченко, Р. В. Закусило // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2013. - № 5. – С. 103 – 107.

88. Тепловое поле алмазной коронки при бурении с нестационарным режимом промывки скважины [Текст] / А. А. Кожевников, С. В. Гошовский, А. Ю. Дреус, И. И. Мартыненко // Доповіді НАН України. – 2007. – № 2. – С. 62-67.

89. Бабилов О. И. Ультразвук и его применение в промышленности [Текст] / О. И. Бабилов. – М. : Государственное издательство физико-математической литературы, 1958. – 257 с.

90. Физические свойства минерального вещества в термобарических условиях литосферы [Текст] / Лебедев Т. С., Корчин В. А., Савенко Б. Я. [и др.] – Киев : Наукова думка, 1986. – 200 с.

91. Ермолов И. Н. Методы и средства неразрушающего контроля [Текст] / И. Н. Ермолов, Ю. А. Останин. – М. : Высшая школа, 1988. – 368.

92. Гежий А. И. Минерально-сырьевая база облицовочного камня днепропетровской области [Текст] / А. И. Гежий // Географія, геоекологія, геологія: досвід наукових досліджень. – 2009. – № 6. – С. 85-87. – ISBN 978-966-475-414-6.

93. Зварыгин В. И. Буровые станки и бурение скважин [Текст] / В. И. Зварыгин. – Красноярск: СГУ, 2012. – 256 с. – ISBN 978-5-7638-2691-3.

94. Третьяк Л. Н. Обработка результатов наблюдений [Текст] / Л. Н. Третьяк. – Оренбург : ГОУ ОГУ, 2004. – 171 с.

95. Терентьев О.М. Вибухо-механічне руйнування гірських порід концентрованим ударним ядром [Текст] / О.М. Терентьев, П.А. Гонтарь // Матеріали VII міжнародної науково-технічної конференції «Енергетика. Екологія. Людина». ІЕЕ, НТУУ «КПІ», 2015. – С. 419 – 424.

96. Терентьев О.М. Энергоемкость взрыва - механического разрушения горных пород [Текст] / О.М. Терентьев, П.А. Гонтарь // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2014. – № 2 – С. 31 – 36.

97. Терентьев О. М. Пат. 107732 Україна, МПК E21B 7/00. Спосіб комбінованого руйнування гірських порід [Текст]: / О. М. Терентьев, В. Г.

Кравець, П. А. Гонтарь ; Заявник та патентовласник : НТУУ «КПІ», Київ ; заявл. 13.05.2013 ; опубл. 10.02.2015. Бюл. № 22. – 5 с.

98. Dynamic fracture criteria for ductile and brittle metals / T. W. Barbee, Jr Seaman, R. L. Crewdson, D. R. Curran // Journal of materials. JMLSA. – 1972. – 7 – P. 393 – 401.

99. Будников В.Ф. Проблемы механики бурения и заканчивания скважин [Текст] / В. Ф. Будников, А. И. Булатов, П. П. Макаренко. – М. : Недра, 1996. – 495 с. - ISBN: 5-247-03642-5.

100. Griffith A. A. The phenomena of rupture and flow in solids [Text] / A. A. Griffith // Philosophical transactions of the Royal Society of London. - 1920 – P. 163-198.

101. Басарыгин Ю. М. Теория и практика предупреждения осложнений и ремонта скважин при их строительстве и эксплуатации [Текст] / Ю. М. Басарыгин, В. Ф. Будников, А. И. Булатов. – М. : ООО «Недра-Бизнесцентр», 2001. – 399 с.

102. Николаева Е. А. Основы механики разрушения [Текст] / Е. А. Николаева. – Пермь : ПГТУ, 2010. – 103 с.

103. Бартенев Г. М. Прочность и разрушение высокоэластических материалов [Текст] / Г. М. Бартенев, Ю. С. Зуев. - М. : Химия, 1964. – 388 с.

104. Екобори Т. Физика и механика разрушения и прочность твердых тел. [Текст] / Т. Екобори. - М. : Мир, 1971. - 264 с.

105. Журков С. Н. Временная зависимость прочности твердых тел [Текст] / С. Н. Журков, Б. Н. Нарзулаев // Журнал технической физики. - 1953. - № 10. - С. 1677-1681.

106. Баюк Е. И. Физические свойства минералов и горных пород при высоких термодинамических параметрах [Текст] / Е. И. Баюк, И. С. Томашевская, В.М. Добрынин. – М.: Недра, 1988. – 255 с. – ISBN 5-247-00200-8.

107. Irwin G. R. Fracture dynamics [Text] / G. R. Irwin // Fracturing of metals (ASM) Symp. – 1948. – P. 147 – 166.

108. Simulation of spall fracture of aluminum and magnesium over a wide range of load duration and temperature [Text] / Kanel G. I., Razorenov S. V., Bogatch A. [та ін.] // International journal of impact engineering. – 1997. – Vol. 20. – P. 467 - 478.

109. Klepaczko J. R. Dynamic crack initiation, some experimental methods and modeling / J. R. Klepaczko // Crack dynamics in metallic materials. - 1990. – P. 255 - 454.

110. Orowan E. Fracture and strength of solids [Text] / E. Orowan // Reports on progress in physics. – 1949. – P. 185-232.

111. Гадиев С.М. Использование вибрации в добыче нефти [Текст] / С. М. Гадиев. - М. : Недра, 1977. – 159 с.

112. Кирпичев В. Л. О подобии при упругих явлениях [Текст] / В. Л. Кирпичев // Журнал русского физико-химического общества. - 1874. - № 9. – С. 90-120.

113. Rittinger P. R. Lehrbuch der Aufbereitungskunde in ihrer neuesten Entwicklung und Ausbindung systematisch dargestellt [Text] / P. R. Rittinger. – Berlin: Ernst & Kern, 1867. – 595 с.

114. Hanim S. Effects of initial temperature on spoiling of metals [Text] / S. Hanim, J. R. Klepaczko // Journal de Physique. – 2000. - №10. – 397 p.

115. Чигаров А. В. Кристаллографическая и кристаллохимическая база данных для минералов и структурных аналогов [Электронный ресурс] / А. В. Чигаров. – Институт экспериментальной минералогии РАН. – Режим доступа : <http://database.iem.ac.ru/mincryst>.

116. Зельдович Я. Б. Теория детонации [Текст] / Я. Б. Зельдович, А. С. Компанец. – М. : Гос. изд-во технико-теоретической лит-ры, 1955. – 268 с.

117. Кобранова В. Н. Петрофизика [Текст] / В. Н. Кобранова. – М. : Недра, 1986. – 392 с.

118. Корчин В. А. Термобарическое петрофизическое моделирование в геофизике [Текст] / В. А. Корчин, П. А. Буртный, В. П. Коболев. – Киев : Наукова думка, 2013. – 302 с. – ISBN 978-966-00-1360-5.

119. Медведев И. Ф. Режимы бурения и выбор буровых машин [Текст] / И. Ф. Медведев. – М. : Недра. – 1986. – 223 с.
120. Иоффе А. Ф. Деформация и прочность кристаллов [Текст] / А. Ф. Иоффе, М. В. Кирпичев, М. А. Левитская // Успехи физических наук. – 1967. – Т. 93. – № 2. – С. – 303 – 314.
121. Иоффе А. Ф. Механические свойства кристаллов [Текст] / А. Ф. Иоффе // Успехи физических наук. – 1967. – Т. 93. – № 2. – С. – 303 – 314.
122. Ставрогин А. Н. Экспериментальная физика и механика горных пород [Текст] / А. Н. Ставрогин, Б. Г. Тарасов. – СПб. : Наука. – 2001. – 343 с. – ISBN 5-02-024942-4.
123. Мавлютов М. Р. Разрушение горных пород при бурении скважин [Текст] / М. Р. Мавлютов. – М. : Недра, 1978. – 216 с.
124. Терентьев О.М. Анализ критериев энергоэффективного разрушения горных пород [Текст] / О.М. Терентьев, П.А. Гонтарь // Материалы V научно-технической конференции «Энергетика, экология, человек». – Киев: НТУУ «КПИ». – 2013. – С. 174 – 179.
125. Терентьев О. М. Математическая модель комбинированного разрушения горных пород взрыво - механическими нагрузками [Текст] / О. М. Терентьев, П. А. Гонтарь // Theoretical & applied science. – 2014. – Vol. 1. -№ 2 (10). – С. 48 – 53. – DOI: <http://dx.doi.org/10.15863/TAS.2014.02.10.8>.
126. Тоннели и метрополитены [Текст] / В. П. Волков, С. Н. Наумов, А. Н. Пирожкова, В. Г. Храпов. – М. : Транспорт, 1975. – 552 с.
127. Прищепенко А. Б. Шипение снарядов [Текст] / А. Б. Прищепенко. – М. : Директ Медиа, 2012. – 155 с. – ISBN 978-5-99036-461-5.
128. Мальцев В. М. Основные характеристики горения [Текст] / В. М. Мальцев, М. И. Мальцев, Л. Я. Кашпоров. – М. : Химия, 1977. – 320 с.
129. Шидловский А. А. Основы пиротехники [Текст] / А. А. Шидловский. – М. : Машиностроение, 1973. – 321 с.
130. Быстров И. В. Краткий курс пиротехники [Текст] / И. В. Быстров. – М. : Оборонгиз, 1940. – 223 с.

131. Perchlorate containing products [Електронний ресурс]. - California Department of toxic substances control, 2015. – Режим доступу: [https://www.dtsc.ca.gov/LawsRegsPolicies/Regs/upload/HWMP\\_WS\\_dPerch-Sec4.pdf](https://www.dtsc.ca.gov/LawsRegsPolicies/Regs/upload/HWMP_WS_dPerch-Sec4.pdf).

132. Сластунов С. В. Многотрещинный разрыв призабойной зоны пласта высокоэнергетическими носителями [Текст] / С. В. Сластунов, А. А. Шилов, Н. И. Грибанов // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2005. - № 5. – С. 19 – 24.

133. НПАОП 0.00-1.66-13. Правила безпеки під час поводження з вибуховими матеріалами промислового призначення [Текст]. – Замінює НПАОП 0.00-5.31-74, НПАОП 0.00-5.36-92, НПАОП 0.00-1.17-92, НПАОП 0.00-5.34-93, НПАОП 0.00-5.02-96 ; введ. 12-06-13. – К. : Міненерговугілля. – 130 с.

134. Костов И. Минералогия [Текст] / И. Костов. – М.: Мир, 1968. – 584 с.

135. Стефанов Ю. П. Моделирование поведения консолидированных и высокопористых геологических сред в условиях сжатия [Текст] / Ю. П. Стефанов // Вестник ПГТУ. – 2007. - №15. – С. 156 – 169.

136. Голф-Рахт Т. Д. Основы нефтепромысловой геологии и разработки трещиноватых коллекторов [Текст] / Т.Д. Голф-Рахт. – М.: Недра, 1986. – 608 с.

137. Абатуров В. Г. Физико-механические свойства горных пород и породоразрушающий буровой инструмент [Текст] / В. Г. Абатуров. – Тюмень : Нефтегазовый университет, 2007. – 238 с. – ISBN 978-5-88465-868-0.

138. Christensen N. I. Poisson's ratio and crustal seismology [Text] / N. I. Christensen // Journal of geophysical research. – 1996. – Vol. 101. – P. 3139 – 3156.

139. Кишковский А. Н. Атлас укладок при рентгенографических исследованиях [Текст] / А. Н. Кишковский, Л. А. Тютин, Г. Н. Есиновская. – СПб. : «Ленинград», 1987. – 512 с.

140. Кравець В.Г., Прокопенко В.С., Фролов О.О. Вибухові роботи. Фізичні параметри вибуху, елементи технологій, охорона праці: Методичні вказівки. – К.: ВПН ВПК «Політехніка», 2005. – 72 с.

141. Никольский Б.П. Справочник химика. Т. 1. – М.: Химия, 1966. – 1072 с.
142. Глушко В.П. Термические константы веществ. Выпуск 8. – М.: ВИНТИ, 1978. – 535 с.
143. Plane J. M. C. Magnesium chemistry in the upper atmosphere. – Leeds: University of Leeds, 2010. – 20 p.
144. Terentiev O. Rocks fracturing with explosive-mechanical means [Text] / O. Terentiev, P. Gontar // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво». – 2015. - № 28. - С. 71 – 76.
145. Терентьев О.М. Технологія руйнування гірських порід комбінованим вибухо-механічним навантаженням [Текст] / О.М. Терентьев, П.А. Гонтар // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2017. - № 5. – С. 15 – 25. doi: 10.20535/1810-0546.2017.5.00000.
146. Нескоромных В. В. Разрушение горных пород при проведении геологоразведочных работ: учеб. пособие [Текст] / В. В. Нескоромных. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2015. – 396 с. - ISBN 978-5-7638-3157-3.
147. Гулия Н. В. Детали машин [Текст] / Н. В. Гулия, В. Г. Клоков, С. А. Юрков. – М. : Издательский центр «Академия», 2004. – 416 с. – ISBN 5-7695-1384-5.
148. Порцевкий А. К. Основы физики горных пород, геомеханики и управления состоянием массива [Текст] / А. К. Порцевский, Г. А. Катков. – М. : МГОУ, 2004. – 120 с.
149. НПАОП 0.00-1.24-10. Правила охорони праці під час розробки родовищ корисних копалин відкритим способом [Текст]. - Замінює НПАОП 0.00-1.33-94 ; введ. 18-03-10. - К. : Форт, 2010. - 104 с.
150. Про затвердження Технічних правил ведення вибухових робіт на денній поверхні [Текст] : Наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 18 липня 2013 р. № 469 // Офіційний вісник України. – 2013. - № 63 - Ст. 2315.

151. Про затвердження Переліку вибухових матеріалів промислового призначення, допущених до постійного виробництва і застосування [Електронний ресурс] : Наказ Держгірпромнагляду України від 30 січня 2014 р. № 18. – Режим доступу : <http://dnop.gov.ua/index.php/uk/normativna-baza/nakazi/8731-6511>.

152. НПАОП 0.00-3.10-08. Норми безплатної видачі спеціального одягу, спеціального взуття та інших засобів індивідуального захисту працівникам гірничодобувної промисловості [Текст]. – Замінює НПАОП 0.00-3.07-79 (ДНАОП 0.05-3.07-79) ; введ. 23-09-08. – К. : Держгірпромнагляд. – 129 с.

153. Operation and safety instruction manual [Електронний ресурс]. - American augers, 2007. – Режим доступу: <http://www.americanaugers.com/files/21DD10000.pdf>.

154. Укрэнерго: традиции профессионализма и надежности [Электронный ресурс]. - Национальная энергетическая компания «Укрэнерго», 2013. – Режим доступа : <http://cigre.org.ua/files/ips2013.pdf>

155. Берковский Б. М. Проблемы энергетики мира [Текст] / Б. М. Берковский // Курьер Юнеско. Энергия будущего. – 1978. - № 7. – С. 5 – 7. - ISSN 0304-3150.

156. CO<sub>2</sub> emission from fuel combustion [Електронний ресурс]. - International energy agency statistics, 2013. – Режим доступу :<http://dx.doi.org/10.1787/2219944>.

157. Сафронова Н. А. Экономика предприятий [Текст] / Н. А. Сафронова, Е. В. Арсенова, Я. Д. Балыков. – М. : Юристъ, 1998. – 584 с. - ISBN 5-7975-0109-0.

158. Про електроенергетику [Електронний ресурс] : Закон України від 16 жовтня 2015 р. № 575/97-ВР. – Режим доступу : <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/575/97-%D0%B2%D1%80>.



## ДОДАТОК А

### Акт впровадження вибухо-механічного руйнування гірських порід

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «Укрвибухбуд»

« 02 » вересня 2014 р.

Вознюк В. М.

#### АКТ

впровадження результатів досліджень Гонтаря Павла Анатолійовича на тему «Руйнування гірських порід комбінованими вибухо-механічними навантаженнями»

Комісія у складі: від ТОВ «Укрвибухбуд» - директор Вознюк В. М. та головний інженер Зайдліч О. Й.; від ІЕЕ, НТУУ «КПІ» - д.т.н., професор кафедри електромеханічного обладнання енергоємних виробництв, Терентьев О. М. та аспірант кафедри електромеханічного обладнання енергоємних виробництв Гонтарь П. А. склали акт у наступному:

ТОВ «Укрвибухбуд» засвідчує, що ним були прийняті до впровадження результати дисертаційних досліджень Гонтаря П. А. «Руйнування гірських порід комбінованими вибухо-механічними навантаженнями»

Впровадження відбулось у технологічному процесі ПП «Давидівський гранкар'єр», вивчалось зниження енергоємності руйнування гірських порід внаслідок формування комплексної тріщинуватості на вибої вибухо-механічними навантаженнями.

У результаті впровадження вибухо-механічного навантаження вибою досягнуто: зниження енергоємності руйнування гранітів з 201 кВт·год/м<sup>3</sup> до 188 кВт·год/м<sup>3</sup>, внаслідок формування додатково до природної, технологічної тріщинуватості вибою.

Розрахунок річного економічного ефекту, наведений в Додатку, виконаний у відповідності до чинних в Україні методичних та нормативних документів склав 24 тис. грн. Економічний ефект буде уточнюватись протягом двох років, починаючи з 2015.

Цей акт не є підставою щодо взаємних фінансових розрахунків.

Даний акт складено у 2 примірниках.

Договір підписали:



Від ІЕЕ, НТУУ «КПІ»

професор

енергоємних виробництв

Терентьев О. М.

Аспірант

Гонтарь П. А.

« 02 » вересня 2014 р.

Від підприємства

Директор

Вознюк В. М.

Головний інженер

Зайдліч О. Й.

« 02 » вересня 2014 р.

Монографія

**РЕЗОНАНСНЕ ЕНЕРГООЩАДНЕ  
РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД**

**ТОМ 2  
ВИБУХО-МЕХАНІЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ  
ВИБОЇВ**

*Рекомендовано до друку Вченою радою  
Національного технічного університету України  
«Київського політехнічного інституту імені Ігоря  
Сікорського» (протокол № 5 від 14 травня 2018)*

Підписано до друку 17.05.2018 Формат 60х84 1/16  
Папір офсетний. Друк цифровий. Гарнітура: Times.  
Ум. друк. арк. 9,42. Тираж 100 прим.

Видавництво «Вік принт»  
вул. Кулібіна, 11-а, оф. 204, м.Київ, 03062  
тел./факс: 206-08-57

Свідоцтво про внесення до Держреєстру  
серія ДК № 4650 від 06.11.2013 р.



**ТЕРЕНТЬЄВ Олег Маркович** – д.т.н., професор кафедри електромеханічного обладнання енергоємних виробництв КПІ ім. Ігоря Сікорського. Нагороджений знаками «Відмінник освіти України» та «Викладач-дослідник». Засновник наукового напрямку «Фізико-технічні основи керування внутрішнім потенціалом середовищ». Підготував 5 кандидатів технічних наук. Опубліковано понад 250 наукових робіт, 32 патенти.



**СТОВПНИК Станіслав Миколайович** – к.т.н., доцент, завідувач кафедри геоінженерії КПІ ім. Ігоря Сікорського. Автор 85 наукових робіт та 10 патентів на винахід та 5 патентів на корисну модель. Тематика наукових досліджень пов'язана з механікою гірських порід і стійкістю гірничих виробок.



**ГОНТАРЬ Павло Анатолійович** – PhD, призер міжнародного форуму-конкурсу «Проблеми надрокористування». Автор 14 наукових робіт, серед них 1 патент на винахід.



**КЛЕЩОВ Антон Йосипович** – PhD, лауреат премії Верховної ради України в галузі фундаментальних і прикладних досліджень та науково-технічних розробок. Автор 30-ти наукових робіт, серед яких 3 патенти та 2 статті, що включені до бази Scopus.